



**Ângela Sofia Lourenço Amaral**

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

## **Contributo para a Metodologia de Projeto de Moldes de Rotomoldagem com Aquecimento Integrado**

Orientador: Professor Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho,  
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado da Faculdade de  
Ciências e Tecnologia

Arguente: Doutor Daniel Cardoso Vaz, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia

Vogais: Engenheiro João Paulo carita Guerra, Engenheiro Mecânico, Sócio Gerente  
da Penta i9, Lda.

Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2019**

**Contributo para a metodologia de projeto de moldes de rotomoldagem com aquecimento integrado.**

Copyright © Ângela Sofia Lourenço Amaral, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## **Agradecimentos**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação não teria sido possível sem a ajuda do Professor Doutor Alberto Martinho, Professor Doutor António Mourão e do Professor Doutor Daniel Vaz. Aos três gostaria de agradecer o apoio ao longo destes meses.

Não poderia deixar de agradecer à FCT, a casa que me acolheu, e a todos os professores e colegas que tornaram estes cinco anos tão especiais.

Aos engenheiros da empresa onde passei os últimos 6 meses, pela companhia que me fizeram e toda a sabedoria que foram partilhando comigo. Em especial ao Engenheiro João Nunes, sem o qual não teria tido esta oportunidade e ao Engenheiro João Guerra, por tudo o que me ensinou sobre rotomoldagem e pelos dados fornecidos, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

À minha família, aos meus pais, avós e irmão, por estarem sempre lá quando precisei. Ao meu pai, que deste pequena me diz ‘Hoje escolhes os estudos em vez de passeio, para no futuro te poderes dar ao luxo de passear’.

E deixando o melhor para o final, ao meu namorado, a quem eu admiro, por ter estado sempre ao meu lado nos últimos anos. Obrigada por me ajudares a tornar-me uma pessoa melhor.



## Resumo

---

A rotomoldagem é ainda um processo pouco estudado e melhorado, apesar de ter várias aplicações interessantes na indústria de produção de componentes cujos materiais são polímeros. Este método adequa-se à produção de peças em pequenas quantidades como, por exemplo, protótipos ou peças em constante alteração. Dada a simplicidade do processo, os seus moldes tendem a ser muito mais baratos dos utilizados na injeção, sendo este um dos pontos mais atraentes do método. No entanto, as máquinas mais simples (*rock and roll*), que utilizam uma chama para aquecer os moldes, desperdiçam cerca de 90% da energia.

Esta dissertação surgiu da preocupação duma empresa de rotomoldagem em reduzir os elevados custos energéticos atuais. Tendo esta preocupação como base foi proposto o estudo de um molde com aquecimento integrado, com o objetivo de redução dos custos de produção de peças por rotomoldagem. Foi escolhido o óleo como método de aquecimento do molde, tendo posteriormente sido estudada a aplicabilidade desse método, tendo como preocupação os seguintes fatores: tempo de aquecimento / arrefecimento do molde – tempo de ciclo, uniformidade da temperatura no interior do molde e poupança energética.

Com a aplicação de aquecimento a óleo em moldes de rotomoldagem prevê-se que a redução nos custos de produção ronde os 10%, com uma redução de 12% dos custos energéticos e de cerca de 50% no tempo de ciclo.

**Palavras-chave:** Rotomoldagem; Aquecimento; Gradiente de temperatura; Custos energéticos, tempo de ciclo

---



## Abstract

---

The rotational molding process hasn't been target of many studies and improvements, despite its very interesting applications in the polymer production industry. This method is great for production of small parts, such as prototypes or pieces in constant change. Due to its simplicity, rotational molding molds tend to be cheaper, which is one of the things that makes this method so attractive. However, the more rudimental machines, rock and roll, which use an open flame to heat the mold, waste around 90% of energy.

This thesis is a result of an intention of a rotational molding company to reduce the high energy costs. Having this concern in mind, the study of a mold with integrated heating was proposed, with the purpose of reducing the costs of production of rotational molding. Oil was chosen as the method of heating the molds and its applicability was studied, having the following primary concerns: Heating / Cooling time – Cycle time, temperature uniformity inside of the mold and energetic savings.

Using oil as a heating method for rotational molding the production costs reduction is estimated to be around 10%, with a 12% reduction of energy costs and a 50% reduction in cycle time.

**Keywords:** Rotational molding; Heating; Temperature gradient, Energy costs, cycle time

---





# Índice de Matérias

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Matérias.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tabelas.....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas .....</b>	<b>xvii</b>
Símbolos .....	xvii
Abreviaturas.....	xviii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução à Rotomoldagem .....	1
1.2 Peças Obtidas por Rotomoldagem .....	4
1.3 Vantagens e Desvantagens do Processo.....	5
1.4 Objetivos / Interesse da Tese.....	7
<b>2. Aquecimento Com Fluido Térmico.....</b>	<b>9</b>
2.1 Introdução.....	9
2.2 Escolha do Fluido Térmico .....	10
2.3 Equipamento de Controlo de Temperatura .....	12
<b>3. Considerações Sobre a Geometria do Molde e a Pressurização do Reservatório</b>	<b>15</b>
3.1 Sobre a Geometria do Molde.....	15
3.2 Respirador .....	18
3.3 Pressurização do Reservatório.....	19
<b>4. Ponto de Funcionamento da Bomba .....</b>	<b>21</b>
4.1 Considerações Iniciais.....	21
4.2 Estudo das Perdas de Carga.....	21
4.2.1 Considerações Iniciais .....	21
4.2.2 Primeira Iteração .....	21
<b>5. Estudo das Deformações no Molde.....</b>	<b>29</b>
5.1 Deformação Devido à Pressão .....	29

5.2	Dilatação Térmica .....	34
<b>6.</b>	<b>Tempos de Aquecimento e Arrefecimento .....</b>	<b>37</b>
6.1	Simplificações de Simulação.....	37
6.2	Resultados do SolidWorks Flow .....	38
6.2.1	Aquecimento .....	39
6.2.2	Arrefecimento.....	43
6.3	Cálculo Analítico.....	46
6.3.1	Modelo e Formulação Analítica .....	46
6.3.2	Coeficiente de Convecção do Óleo e do Ar .....	48
6.4	Comparação de Resultados .....	51
<b>7.</b>	<b>Estimativa do Consumo Energético.....</b>	<b>55</b>
7.1	Parcelas de Consumo .....	55
7.2	Energia de Aquecimento / Arrefecimento do Óleo .....	55
7.3	Energia de Aquecimento / Arrefecimento do Molde .....	56
7.4	Perdas Energéticas por Convecção.....	57
7.5	Perdas Energéticas por Radiação .....	57
7.6	Custo Energético por Peça .....	58
7.6.1	Primeira Abordagem – Um Único Circuito de Óleo .....	58
7.6.2	Segunda Abordagem – Dois Circuitos de Óleo.....	59
<b>8.</b>	<b>Redução de Custos .....</b>	<b>61</b>
8.1.1	Poupança Energética .....	61
8.1.2	Poupança Relativa à Mão-de-Obra.....	62
<b>9.</b>	<b>Aplicabilidade do Método a Outras Geometrias .....</b>	<b>65</b>
9.1	Tempo de Aquecimento .....	67
9.2	Custo Energético .....	68
9.2.1	Aquecimento / Arrefecimento da Massa de Óleo.....	68
9.2.2	Aquecimento / Arrefecimento do Molde.....	68
9.2.3	Perdas por Convecção .....	69
9.2.4	Perdas por Radiação .....	69
<b>10.</b>	<b>Estudo dos Custos da Solução .....</b>	<b>73</b>
10.1	Fatores que Exigem Investimento .....	73

10.2	Custos de Fabrico do Molde.....	73
10.3	Custos de Adquisição de Equipamento .....	73
10.4	Custos do Braço Rotativo.....	74
10.5	Análise Custo VS Benefício.....	74
<b>11.</b>	<b>Proposta Para Metodologia de Projeto .....</b>	<b>75</b>
<b>12.</b>	<b>Sugestão de Trabalhos Futuros.....</b>	<b>77</b>
<b>13.</b>	<b>Discussão e Conclusões .....</b>	<b>79</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>81</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>83</b>



# Índice de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática do processo de rotomoldagem [1] .....	1
Figura 2 - Temperatura do forno, da superfície interior e exterior do molde e do ar no interior do mesmo, em função do tempo (aquecimento e arrefecimento) [1].....	2
Figura 3 - Diferença de temperaturas nas faces do molde, no aquecimento e no arrefecimento [1] .....	3
Figura 4 - Fases do polímero durante o aquecimento [1] .....	4
Figura 5 - Exemplos de peças obtidas por rotomoldagem.....	5
Figura 6 - Peça protótipo, Punta Finger.....	7
Figura 7 - Molde em uso atualmente.....	7
Figura 8 - Máquinas rock and roll (esquerda) e carrossel (direita). Fotos tiradas na empresa. ....	8
Figura 9 - Equipamento Leonardo, Persico.....	10
Figura 10 - Equipamento de controlo de temperatura Regloplas 300LD. ANEXO 4 .....	13
Figura 11 - Sistema de controlo Regloplas 300LD [4].....	13
Figura 12 - Zonas A e B para posicionamento preferencial dos furos de entrada/saída do fluido.....	16
Figura 13 - Distribuição do fluido num molde com 10mm de distância entre paredes .....	17
Figura 14 - Distribuição do fluido num molde com 5mm de distância entre paredes .....	17
Figura 15 - Geometria final do molde e zona de passagem do fluido.....	18
Figura 16 . Pressão de vapor do óleo Galp Termoil SY em função da sua temperatura [ANEXO 2] .....	20
Figura 17 – Simplificação da área transversal do molde [mm] .....	23
Figura 18 – Primeira aproximação do comprimento do tubo.....	23
Figura 19 - Diagrama de Moody .....	24
Figura 20 - Acabamentos superficiais.....	25
Figura 21 - Coeficiente de perda de carga singular para entradas e saídas [6].....	26
Figura 26 - Gráfico das perdas de carga do molde .....	28
Figura 27 - Deformações provocadas no molde por uma pressão absoluta interna de 2 bar .....	30
Figura 28 - Variação do módulo de Young com a temperatura para o alumínio [9] .....	32
Figura 29 - Área superficial considerada e largura do molde.....	33
Figura 30 – Placa plana equivalente, considerada no cálculo da deformação máxima.....	33
Figura 31 - Diferença máxima de temperatura para vários caudais.....	34
Figura 32 - Distância entre os pontos de maior e menor temperatura. ....	35
Figura 33 - Temperatura média da superfície interna do molde em função do tempo - SolidWorks.....	39
Figura 34 - Temperatura Máxima da superfície interna do molde em função do tempo - SolidWorks .....	39
Figura 35 - Temperatura mínima da superfície interior do molde em função do tempo - SolidWorks.....	40
Figura 36 - Diferença de temperatura no molde em função do tempo na fase de aquecimento - SolidWorks .....	40
Figura 37 - Aumento do coeficiente de convecção do óleo com o aumento do caudal .....	41
Figura 38 - Diferença máxima de temperatura no molde em função do tempo .....	42
Figura 39 - Distribuição da temperatura no molde passados 9 minutos .....	42

<i>Figura 40 - Temperatura média da superfície interna do molde em função do tempo – com base em dados provenientes da simulação no SolidWorks.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 41 - Temperatura Máxima da superfície interna do molde em função do tempo – SolidWorks.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 42 – Temperatura mínima da superfície interna do molde em função do tempo – SolidWorks.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 43 - Diferença de temperatura no molde em função do tempo – SolidWorks.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 44 - Distribuição da temperatura no molde passados 7 minutos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 45 - Esquema simplificado do molde.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 46 - Volume de controlo considerado e balanço energético.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 47 - Número de Prandtl do ar em função da temperatura.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 49 - Resultados analíticos (azul) e resultados numéricos (vermelho).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 50 - Aumento do coeficiente de convecção do óleo com o aumento do caudal.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 51 - Tempo de aquecimento do molde em função do caudal.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 52 - Parcelas consideradas no cálculo do consumo energético.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 53 - Calor específico do óleo Galp Ternoil SY em função da temperatura [ANEXO 2].....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 54 - Calor específico do alumínio em função da temperatura [13].....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 55 - Molde com aquecimento integrado para produção do Doseador 100L.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 56 - Temperatura média do molde em função do tempo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 57 - Diferença máxima de temperatura na superfície do molde em contacto com o polímero.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 58 - Fluxograma do método.....</i>	<i>76</i>

## Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Comparação dos processos de rotomoldagem, injeção e blow molding.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2 - Coeficiente de transferência de calor, h, para situações típicas. [3].....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 3 - Alternativas de fluidos de aquecimento.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 4 - Características principais dos equipamentos selecionados.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 5 - Valores considerados no cálculo das perdas de carga.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 6 - Perdas de carga distribuídas para diferentes caudais na gama de funcionamento da bomba.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 7 - Valores considerados no cálculo das perdas de carga na zona de entrada.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 8 - Perdas de carga localizadas à entrada para vários caudais na gama de funcionamento da bomba [Pa] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 9 - Perdas de carga localizadas à saída para vários caudais na gama de funcionamento da bomba, em função da geometria de saída [Pa].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 10 - Perdas de carga totais para alguns caudais na gama de funcionamento da bomba .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 17 - Valores utilizados no cálculo da deformação máxima.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 18 – Condições consideradas nas simulações em SolidWorks Flow.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 19 - Emissividades do alumínio para diferentes temperaturas e acabamentos [14].....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 20 – Energia a fornecer ao molde para o aquecimento .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 21 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 22 - Energia a fornecer ao molde para o aquecimento.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 23 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 24 - Custo por kWh da eletricidade VS gás.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 25 - Custo total por peça [€] produzida no forno VS no molde em estudo .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 26 - Energia a fornecer ao sistema para o aquecimento.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 27 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 28 - Custo de produção por peça .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 29 - Distribuição de custos em rotomoldagem [15].....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 30 - Investimento inicial requerido para realização de testes.....</i>	<i>74</i>





# Lista de Símbolos e Abreviaturas

## Símbolos

Símbolo	Significado
A	Área, m <sup>2</sup>
Bi	Número de Biot
$c_p$	Calor específico, kJ/kg°C
d	Espessura, m
D	Diâmetro, m
E	Modulo de Young, Pa
E	Potência irradiada, W/m <sup>2</sup>
f	Coeficiente de atrito
Gr	Número de Grashoff
$g$	Aceleração gravítica, m <sup>2</sup> /s
h	Coeficiente de convecção, W/m <sup>2</sup> °C
k	Coeficiente de condutividade térmica, W/m°C
L	Comprimento, m
m	Massa, kg
Nu	Número de Nusselt
P	Perímetro molhado, m
P	Pressão, Pa
Pr	Número de Prandtl
Q	Caudal volumétrico, l/min
q	Calor transferido, J
$q_0$	Carregamento distribuído, N/m
$\dot{Q}$	Potência térmica transferida, W
Ra	Número de Rayleigh

Re	Número de Reynolds
t	Tempo, s
T	Temperatura, °C
T <sub>p</sub>	Temperatura de película, °C
T <sub>∞</sub>	Temperatura ambiente, °C
U	Velocidade do escoamento, m/s
V	Volume, m <sup>3</sup>
w	Deformação de uma placa plana, m
ΔT	Variação de temperatura, °C
ΔP	Variação de pressão, Pa
ΔL	Dilatação térmica, m
β	Coefficiente de dilatação térmica, °C <sup>-1</sup>
ρ	Massa volúmica, kg/m <sup>3</sup>
ω	Frequência angular, Hz
ε	Emissividade
σ	Constante de Stephan-Boltzmann, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Ø	Diâmetro, m
Ø <sub>h</sub>	Diâmetro hidráulico, m
ξ	Coefficiente de perda de carga localizada
ν	Viscosidade cinemática, mm <sup>2</sup> /s

## Abreviaturas

Sigla	Significado
PEAD	Polietileno de Alta Densidade

# 1. Introdução

## 1.1 Introdução à Rotomoldagem

O processo de rotomoldagem, consiste na introdução de um polímero em pó num molde (Figura 1 - a) que é posteriormente aquecido, geralmente no interior de um forno, enquanto roda totalmente segundo dois eixos (Figura 1 - b). Este movimento de rotação lenta, combinado com a ação da força gravítica permite a distribuição do polímero de forma uniforme pela superfície do molde.

Atingida uma certa temperatura o pó coalesce<sup>1</sup>, formando uma camada uniforme, momento a partir do qual cessa o aquecimento e é iniciada a fase de arrefecimento (Figura 1 - c). Finalmente é atingida uma temperatura à qual a peça começa a descolar das paredes do molde podendo finalmente ser desmoldada (Figura 1 - d).

O movimento de rotação constante do molde em diferentes direções é muito importante para garantir uma boa distribuição do polímero nas paredes do molde, garantindo assim a geometria da peça e, tanto quanto possível, a uniformidade da espessura de parede. Assim, este movimento é mantido mesmo durante o arrefecimento, até à temperatura de cristalização do polímero, a partir da qual não há risco de alteração da geometria. Uma exceção disto é o polietileno reticulado que cristaliza muito perto da temperatura de coalescência, não havendo risco de alteração da geometria durante o arrefecimento. No entanto nesta dissertação o material a considerar será sempre polietileno de alta densidade (PEAD).

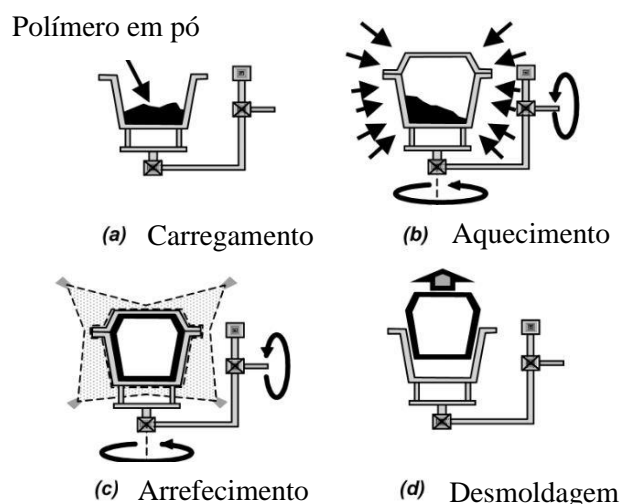


Figura 1 – Representação esquemática do processo de rotomoldagem [1]

<sup>1</sup> Coalescência – formação de uma estrutura única a partir de várias partículas, neste caso de polímero em pó. Em algumas obras utiliza-se o termo sinterização mas, segundo R.J. Crawford [1] esta ocorre abaixo da temperatura de fundição, sendo a coalescência para temperaturas acima desta.

Na Figura 2 pode-se observar a variação da temperatura do ar no interior do molde em função do tempo, assim como a temperatura do forno e das superfícies interior e exterior do molde. É de salientar a importância da medição da temperatura no interior do molde e não a do exterior, uma vez que a primeira representa melhor a temperatura real do polímero. Como se pode ver na Figura 3, a leitura da temperatura no exterior representa um atraso relativamente à do interior e, em cada instante, estas diferem em até 25°C no caso representado, não sendo este valor constante. Este valor irá certamente depender do molde em questão (material, espessura, geometria). Os pontos A, B, C, D, E e F indicados na Figura 2 são explicados mais à frente.

No entanto, a rotomoldagem é um processo bastante empírico em que é comum ser medida apenas a temperatura exterior. É também algo comum não haver qualquer tipo de medição constante, sendo os parâmetros ajustados por tentativa-erro.

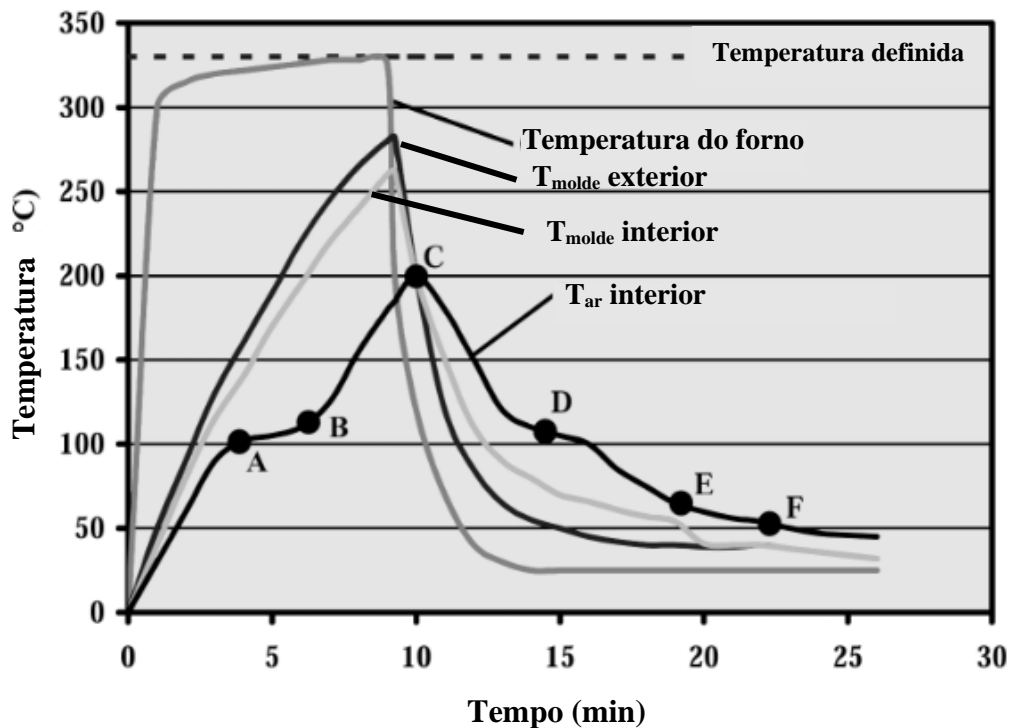


Figura 2 - Temperatura do forno, da superfície interior e exterior do molde e do ar no interior do mesmo, em função do tempo (aquecimento e arrefecimento) [1]

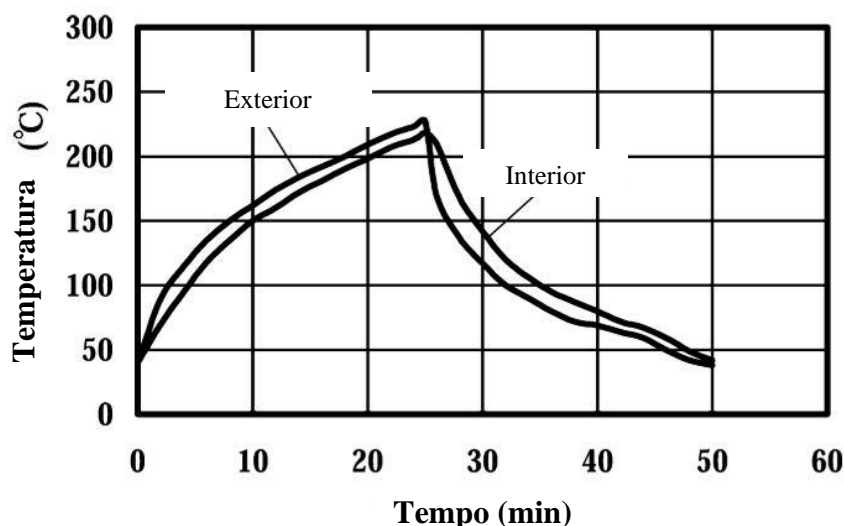
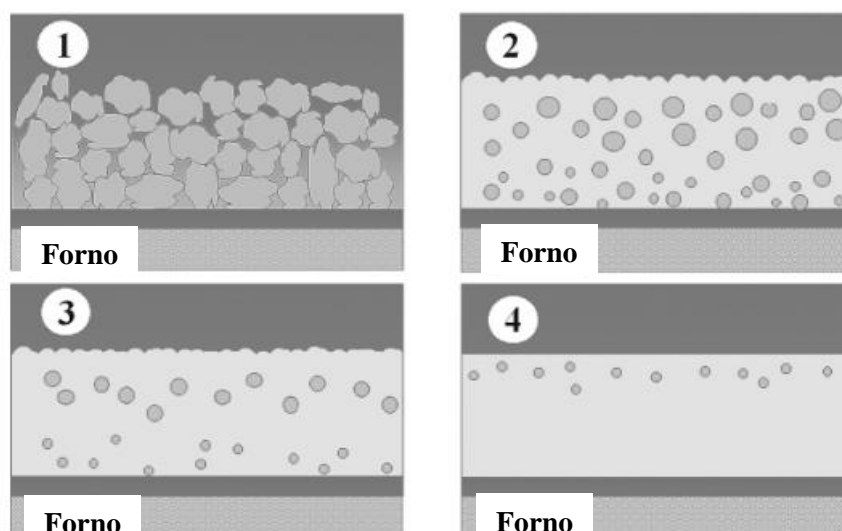


Figura 3 - Diferença de temperaturas nas faces do molde, no aquecimento e no arrefecimento [1]

Analisando a Figura 2 pode-se concluir que a taxa de variação de temperatura no aquecimento e arrefecimento não é constante. Isto deve-se a diferentes fenómenos que ocorrem no polímero durante essas fases que o levam a absorver mais ou menos energia, ou até mesmo a emití-la, reduzindo a taxa de arrefecimento.

De forma muito simplificada podem-se distinguir, na Figura 2, os seguintes pontos de interesse, que se prendem com o estado do polímero (ver Figura 4)

- Até ao ponto A o polímero ainda se encontra em pó ‘seco’ (fase 1). As paredes do molde começam a aquecer e o aumento da temperatura é linear, de acordo com  $\dot{Q} = m c_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$ .
- Até ao ponto B as partículas de pó começam a aderir umas às outras e às paredes do molde (fase 2). Isto ocorre à sua temperatura de aderência, cerca de 130°C para o PEAD, como se pode confirmar no gráfico da Figura 2. Este processo absorve energia (adicionalmente àquela que o molde continua a absorver) pelo qual o declive em A-B diminui, tornando-se quase nulo (mudança de fase).
- Entre os pontos B e C o polímero vai formando uma camada única e perdendo as bolhas de ar, fenómeno representado na fase 3.
- No ponto C a maioria das bolhas desaparece e a peça fica em condições de ser arrefecida (fase 4). Pode-se ver na Figura 2 uma mudança de sinal no declive do gráfico, representando a saída do molde do forno.
- A cristalização em polietileno de alta densidade ocorre entre os pontos D e E. Sendo este um processo exotérmico pode-se ver uma diminuição bastante acentuada do declive da curva.
- No ponto E a peça começa a perder a aderência ao molde, ficando em condições de ser desmoldada.



*Figura 4 - Fases do polímero durante o aquecimento [1]*

Um dos parâmetros da qualidade de peças produzidas por rotomoldagem é precisamente a quantidade de bolhas ainda presentes numa secção transversal da peça. Se esta tiver muitas bolhas significa que não ficou tempo suficiente no forno (Figura 4, fase 3). Se, por outro lado, não tiver alguma bolha significa que provavelmente terá ficado demasiado tempo, comprometendo as propriedades do polímero. Em ambos casos as propriedades químicas e mecânicas da peça ficarão aquém do desejável. Assim, o ideal será uma secção transversal com algumas bolhas na face interna da peça, aquela que não se encontrava em contacto com o molde (Figura 4, fase 4).

É de salientar que a energia absorvida ou emitida pelo polímero não é considerada nesta dissertação pois, em comparação com as restantes parcelas energéticas, foi considerada desprezável. Não é tampouco considerada no cálculo de tempos de ciclo, uma vez que estes dependerão sempre de vários fatores, como por exemplo a temperatura do exterior, tendo sempre de ser ajustados experimentalmente. Contudo, não se prevê que esta simplificação venha a alterar os resultados de forma significativa.

## 1.2 Peças Obtidas por Rotomoldagem

A rotomoldagem é um processo para a produção de peças poliméricas que não requeiram elevada precisão. A força gravítica é a única responsável pela distribuição do polímero no molde (a pressão no seu interior é a pressão ambiente). Associado aos baixos custos, a rotomoldagem é o processo ideal para fabrico de peças com tolerâncias geométricas e dimensionais relativamente elevadas. É possível obter, no entanto, uma boa uniformidade de espessura nas peças devido ao movimento de rotação biaxial.

Algumas peças obtidas por rotomoldagem que tendem a ser difíceis de obter por outros processos são contentores de grandes dimensões (numa peça única), peças de geometria complexa, peças ocas e de parede oca, entre outros. Na Figura 5 encontram-se alguns exemplos de peças obtidas por rotomoldagem.



*Figura 5 - Exemplos de peças obtidas por rotomoldagem<sup>2</sup>*

### **1.3 Vantagens e Desvantagens do Processo**

Uma das maiores vantagens da rotomoldagem é o baixo custo dos seus moldes, que o tornam o processo ideal para produção em quantidades reduzidas (em comparação com as quantidades adequadas ao fabrico por injeção), ou para produtos em alteração constante.

Para além da sua relativa simplicidade, o processo de rotomoldagem implica pressão atmosférica no interior do molde, pelo qual os materiais utilizados para construção do mesmo podem ser mais baratos. Adicionalmente à sua contribuição para o baixo custo dos moldes, este facto faz com que os produtos obtidos não tenham praticamente tensões residuais internas. No entanto, devido aos choques térmicos a que são sujeitos, os moldes de rotomoldagem podem ter ciclos de vida menores.

Apesar de o tempo necessário para produzir uma peça por rotomoldagem ser superior a outros métodos (por exemplo, injeção), pois o material/molde é aquecido e arrefecido de forma relativamente lenta, este processo garante um desperdício de material praticamente nulo, o qual reduz os custos de produção.

Uma outra desvantagem deste processo prende-se com o facto de o trabalho manual ser intensivo, pois na maioria dos casos o processo de carregamento (introdução do polímero no molde e montagem do mesmo no braço rotativo) e desmoldagem não são automatizados.

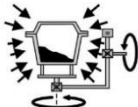
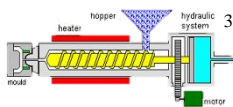
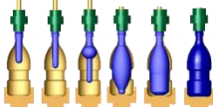


Por último, outro ponto menos positivo da rotomoldagem é a escassez de polímeros disponíveis para o processo, uma vez que estes têm de ser capazes de suportar altas temperaturas por longos períodos. Dada a relativa simplicidade do processo este não tem atraído interesse académico, o qual prejudica o desenvolvimento de polímeros aptos para o processo [1].

---

<sup>2</sup> [https://cxmould.en.ec21.com/Rotational\\_Molding\\_Water\\_Kayak--4600867\\_5208161.html](https://cxmould.en.ec21.com/Rotational_Molding_Water_Kayak--4600867_5208161.html) [acedido a 01/02/2019]

Uma comparação do processo de rotomoldagem com outros processos que visam a obtenção de peças similares como a injeção e *blow molding* encontra-se na Tabela 1.

*Tabela 1 - Comparação dos processos de rotomoldagem, injeção e blow molding*

	<b>Rotomoldagem</b>	<b>Injeção</b>	<b>Blow Molding</b>
<b>Custo do molde</b>	●	●	●
<b>Desperdício de material</b>	●	●	●
<b>Facilidade de produção de peças ocas</b>	●	●	●
<b>Produção de peças de parede oca</b>	●	●	●
<b>Produção de contentores grandes</b>	●	●	●
<b>Espessura de parede uniforme</b>	●	●	●
<b>Geometria complexa</b>	●	●	●
<b>Tempo de ciclo</b>	●	●	●
<b>Precisão Geometria e dimensional</b>	●	●	●
<b>Mão de obra</b>	●	●	●
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <b>Melhor alternativa</b> </div> <div style="text-align: center;">  <b>Alternativa menos vantajosa</b> </div> </div>			

<sup>3</sup> <http://www.silganplastics.com/-technologies/injection-molding> [accedido a 01/02/2019]

<sup>4</sup> <http://www.silganplastics.com/capabilities-technologies/injection-stretch-blow-molding-ISBM> [accedido a 01/02/2019]



## 1.4 Objetivos / Interesse da Tese

A dissertação foi realizada num contexto empresarial, numa fábrica que produz produtos por rotomoldagem. Com base nas suas necessidades e tendo em conta as tecnologias alternativas de rotomoldagem existentes, a empresa optou, inicialmente, pela aquisição de uma máquina do tipo *rock and roll* para o fabrico de contentores de resíduos urbanos.

Em 2019 a empresa já expandiu as suas capacidades de fabrico de peças por rotomoldagem, contando com máquinas do tipo *rock and roll* e carrossel. Estes equipamentos, devido à sua relativa simplicidade, têm um consumo energético bastante elevado pois os seus rendimentos térmicos são relativamente baixos.

Posto isto, a empresa pretende, numa nova fase de crescimento no mundo da rotomoldagem, desenvolver um método com rendimentos superiores, de forma a diminuir os custos de produção.

Para o estudo proposto nesta dissertação foi escolhida uma peça da gama de fabrico da empresa como caso de estudo, a *Punta Finger*. Esta peça, Figura 6, está atualmente a ser obtida por rotomoldagem numa máquina do tipo carrossel, sendo o molde, Figura 7, aquecido num forno. É de salientar que o objetivo da dissertação não passa apenas pela produção de um molde com aquecimento integrado, mas sim de um estudo mais aprofundado para no futuro expandir este novo tipo de molde a outras peças produzidas pela empresa. Assim, o objetivo final da dissertação é o desenvolvimento duma metodologia de projeto para este tipo de molde.

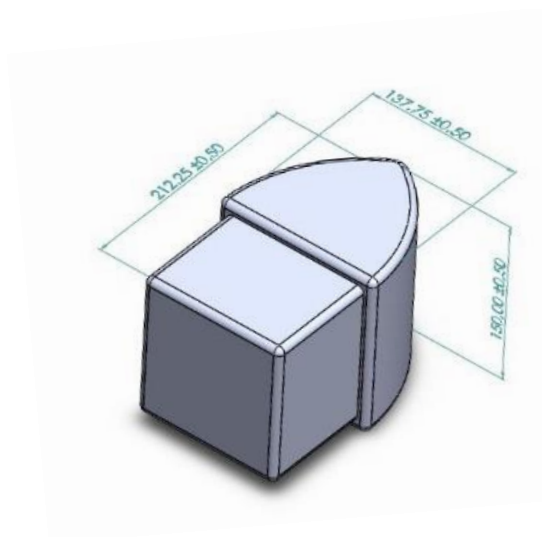


Figura 6 - Peça protótipo, Punta Finger



Figura 7 - Molde em uso atualmente



*Figura 8 - Máquinas rock and roll (esquerda) e carrossel (direita). Fotos tiradas na empresa.*

Será crucial a redução de custos derivados do consumo de energia para o aquecimento dos moldes uma vez que uma melhoria neste campo representará um maior benefício para a empresa. No entanto será também interessante estudar as alterações noutros fatores como, por exemplo, o tempo de ciclo, a quantidade de matéria prima necessária e as características finais da peça, que terão sempre de respeitar critérios da qualidade.

## 2. Aquecimento Com Fluido Térmico

### 2.1 Introdução

Um dos maiores problemas da rotomoldagem é o seu elevado desperdício de energia, sendo que as máquinas de rotomoldagem mais rudimentares, do tipo *rock and roll*, podem chegar a desperdiçar 90% da energia [2]. Em termos de rapidez de aquecimento também é sabido que a convecção natural não é o método de transferência de calor mais célere. É este, no entanto, o método mais comumente utilizado em rotomoldagem.

O coeficiente de convecção é superior quando esta é forçada (ver Tabela 2), sendo ainda maior em líquidos do que em gases (ar).

*Tabela 2 - Coeficiente de transferência de calor, h, para situações típicas. [3]*

Gama de valores para cada tipo de convecção	h [W/m <sup>2</sup> °C]
Convecção natural em gases	2 - 25
Convecção natural em líquidos	10 - 1 000
Convecção forçada em gases	25 - 250
Convecção forçada em líquidos	50 - 20 000
Ebulição e condensação	2 500 - 100 000

Um dos objetivos desta dissertação é a melhoria do processo não só em termos de eficiência energética, mas também na diminuição do tempo de aquecimento dos moldes. Faz assim sentido estudar a possibilidade de aquecimento de um molde de rotomoldagem através de um fluido térmico.

Após alguma pesquisa e reflexão sobre o assunto, são de evidenciar alguns fatores importantes a ter em conta no estudo do aquecimento de um molde através de um fluido térmico:

- Potenciais fugas de óleo nas juntas do molde;
- Potencial dificuldade no fornecimento de fluido a um molde em constante rotação;
- Tipo de fluido a ser utilizado;
- Equipamento necessário para aquecimento (e possível arrefecimento) do fluido;
- Outros equipamentos necessários para, por exemplo, garantir a circulação do óleo;
- Distribuição do fluido no molde de forma a garantir uniformidade térmica (geometria do molde).

Os moldes de rotomoldagem com aquecimento integrado encontram-se ainda numa fase muito inicial. A empresa Persico apresenta o único modelo no mercado com aquecimento integrado, através de um fluido térmico, o modelo Leonardo, na Figura 9. Este modelo é totalmente automatizado, eliminando a necessidade de mão-de-obra, o qual é uma típica desvantagem em rotomoldagem.



*Figura 9 - Equipamento Leonardo, Persico<sup>5</sup>*

## 2.2 Escolha do Fluido Térmico

A escolha do fluido térmico a utilizar é um passo decisivo uma vez que irá influenciar vários fatores como, por exemplo, a temperatura máxima de operação, a pressão do sistema, o tempo de ciclo e o consumo energético do processo.

Da consulta a fluidos térmicos da Galp Portugal, foram definidos alguns possíveis para as aplicações desejadas.

Para poder estabelecer uma comparação entre as alternativas apresentadas foi preenchida a Tabela 3 com algumas propriedades tiradas das fichas técnicas, que podem ser encontradas nos ANEXO 1, ANEXO 2 e ANEXO 3. Foi considerada uma temperatura de 200°C na obtenção das propriedades, pois a temperatura de funcionamento do mesmo rondará certamente este valor.

---

<sup>5</sup> <https://www.persico.com/en/technologies/technologies/rotomoulding/machinery/leonardo> [acedido a 14/03/2019]

Tabela 3 - Alternativas de fluidos de aquecimento

	Temp. Max [°C]	Condutividade Térmica, k [W/m.K] a	Calor Específico, $c_p$ [kJ/kg°C] a 200°C	Pressão de vapor a 200°C [bar]	Ponto de Inflamação [°C]
<b>GALP TERMOIL 32 [Anexo 1]</b>	280	0,126	3,31	0,070	236
<b>GALP TERMOIL SY [Anexo 2]</b>	320	0,108	2,15	0,090	194
<b>GALP TERMOIL SY HF [Anexo 3]</b>	320	0,125	3,25	0,018	245

Prevê-se que a temperatura do óleo necessária para proceder ao aquecimento do molde esteja entre os 200°C e 250°C. Assim, qualquer um dos óleos aconselhados será apto nesse aspeto.

Por análise da Tabela 3 vem:

- Quanto maior a condutividade térmica, mais rápido será o aquecimento do molde. Assim, o óleo mais indicado será o Galp Termoil 32. No entanto, prevê-se que dada a natureza do aquecimento o tempo de ciclo irá diminuir independentemente disto, portanto este poderá não ser um fator muito relevante.
- Pela equação  $Q = m c_p \Delta T$  percebe-se que quanto maior o calor específico maior será a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura da massa de óleo. Assim, dado que o foco principal desta dissertação é a redução de custos energéticos será benéfico escolher um óleo com um calor específico menor. Para este efeito o mais adequado será o Galp Termoil SY
- Relativamente à pressão de vapor, como será abordado mais à frente nesta dissertação, o ideal será que esta assuma valores baixos para o óleo selecionado. No entanto, como a pressão de vapor dos óleos em questão se encontra bastante abaixo da pressão ambiente este fator não será importante na escolha do óleo selecionado.
- O ponto de inflamação deverá ser tido em conta na escolha do óleo, devendo ser superior à temperatura de operação do mesmo. Neste caso foi dada prioridade ao seu calor específico, uma vez que o objetivo da dissertação será a diminuição do consumo energético.

Tendo em conta os pontos acima, o óleo selecionado para esta projeto será o Galp Termoil SY, por permitir uma redução de cerca de 14% no consumo relativo ao aquecimento (e arrefecimento) do mesmo. Relativamente à sua menor condutividade térmica não se prevê que vá afetar o tempo de aquecimento de forma significativa. Uma vez que o seu ponto de inflamação é inferior à sua

temperatura de operação, é muito importante que o mesmo não entre em contacto com oxigénio, por exemplo por consequência de fugas no sistema.

A escolha do fluido térmico irá certamente afetar vários parâmetros como o tempo e uniformidade do aquecimento. Nesta dissertação foi feito o estudo desses parâmetros a partir da escolha de um fluido em particular. Será, no entanto, interessante estudar a forma como estes variam com certas propriedades do fluido como o  $c_p$  ou a difusividade térmica do fluido,  $\alpha$ .

## 2.3 Equipamento de Controlo de Temperatura

Após pesquisa das soluções existentes no mercado foi possível encontrar alguns equipamentos de controlo de temperatura. Estes permitem o aquecimento e arrefecimento do fluido térmico, tudo num só equipamento de dimensões relativamente reduzidas. Para além do controlo de temperatura do fluido, estes têm ainda todos os componentes necessários para a circulação do fluido no sistema a aquecer/arrefecer. Assim, numa só máquina ficam reunidos os seguintes equipamentos principais:

- Permutador de calor – dois, um para aquecer e outro para arrefecer.
- Bomba – para permitir circulação do fluido
- Tanque de expansão – para absorver a expansão/compressão do fluido em função da temperatura

Foi feita uma pesquisa às soluções existentes no mercado e foram contactados três fabricantes relativamente a três equipamentos, cujas características ou fichas de produto se encontram nos ANEXO 4, ANEXO 5 e ANEXO 6.

Na Tabela 4 encontram-se resumidas as características de cada um dos equipamentos mencionados.

*Tabela 4 - Características principais dos equipamentos seleccionados*

	Potência de Aquecimento [kW]	Potência de arrefecimento [kW]	Caudal Máximo [l/min]	Temperatura Máxima de operação [°C]	Obs.
<b>Regloplas 300LD</b> [Anexo 4]	20-40	160	90	300	*
<b>Mokon HTF</b> [Anexo 5]	6-48	opcional	90	260	*
<b>Delta T – T</b> series [Anexo 6]	6-48	190	400	340	-

\* Possibilidade de circuito duplo

Apesar de ter sido possível obter bastante informação online, o único fornecedor que devolveu o contacto foi a Regloplas, permitindo assim perceber melhor o funcionamento do equipamento. O equipamento da Mokon não mencionava potência de arrefecimento, o qual iria dificultar o desenvolvimento deste projeto. Finalmente a DeltaT possui vários equipamentos e não é claro quais as características de cada um sem ter conseguido estabelecer um contacto com o fornecedor.

Por outro lado, apenas os equipamentos da Regloplas e Mokon permitem a possibilidade de existência de um circuito duplo o qual, como será estudado mais adiante, será bastante interessante para a aplicação desejada.

Posto isto, foi escolhido o equipamento Regloplas 300LD (Figura 10) para o estudo desta dissertação. É, no entanto, importante salientar que todos os resultados obtidos facilmente podem ser adaptados a qualquer outro equipamento com capacidades diferentes.

Este equipamento inclui um sistema de controlo (Figura 11) que permite programar todos os parâmetros inerentes ao processo de aquecimento e arrefecimento dos moldes de rotomoldagem. Inclui ainda um temporizador que permite tornar o processo mais automatizado.



*Figura 10 - Equipamento de controlo de temperatura  
Regloplas 300LD. ANEXO 4*



*Figura 11 - Sistema de controlo Regloplas 300LD [4]*





# 3. Considerações Sobre a Geometria do Molde e a Pressurização do Reservatório

## 3.1 Sobre a Geometria do Molde

Em primeiro lugar foi estudada a geometria do molde, por forma a conseguir integrar o fluxo do fluido no mesmo. Existem algumas opções:

- Maquinar pequenas concavidades, onde será albergado um tubo flexível, por exemplo, de cobre.
- Criar uma parede dupla no molde, por onde o fluido poderá fluir de duas formas:
  - Guiado por ‘alhetas’ que ajudam a distribuir o fluido de forma igual por todo o molde, evitando a existência de zonas não alcançadas.
  - Livremente, se houver condições para criar um fluxo uniforme do fluido.

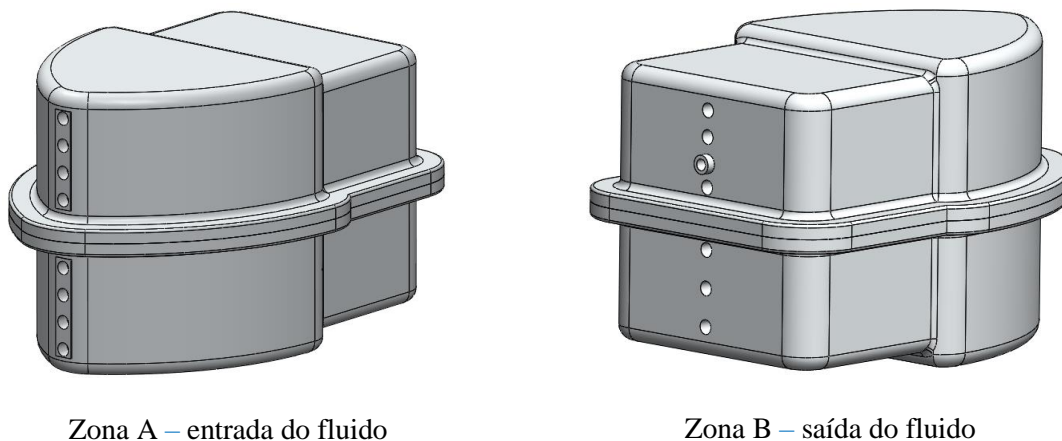
Numa primeira iteração, foram realizadas simulações com um molde de parede dupla em que o fluido flui livremente. Uma das grandes vantagens desta solução será o facto de facilmente poder ser adaptada a moldes das mais variadas geometrias. Em contrapartida, se houver necessidade de incorporar ‘alhetas’ o estudo de futuros moldes será mais complexo e moroso. De relembrar que o objetivo desta dissertação não se limita ao projeto de um molde, mas sim de uma metodologia de projeto de moldes de forma a adaptar, no futuro, a produção de outras peças na empresa a este tipo de tecnologia.

Para poder considerar esta alternativa será necessário garantir que o óleo irá fluir uniformemente, estando, idealmente, em contacto com todos os pontos do molde. Isto irá permitir um aquecimento uniforme, diminuindo as variações de temperatura entre os vários pontos do mesmo. Este é um fator muito importante em rotomoldagem, pois o polímero será aquecido diretamente no molde, sendo importante reduzir os gradientes espaciais de temperatura tanto quanto possível.

Considerando este requisito, foram estudados alguns fatores e a forma como estes afetam o fluxo do óleo, sendo os mais importantes:

- Distância entre paredes,
- Número de furos de entrada/saída,
- Posicionamento dos furos de entrada/saída.

O número e posição dos furos deverá também garantir que o fluxo seja uniforme e bem direcionado. Este fator irá também afetar as perdas de carga no molde estudadas na secção 4.2 desta dissertação. De forma a garantir uma boa distribuição do fluido (ver Figura 14), foi determinada a zona A como a melhor opção para colocar os furos, devido à geometria da peça, que ajudará a distribuir o óleo uniformemente. A zona B será então a mais indicada para o posicionamento dos furos de saída, por se encontrar na extremidade oposta à zona A.



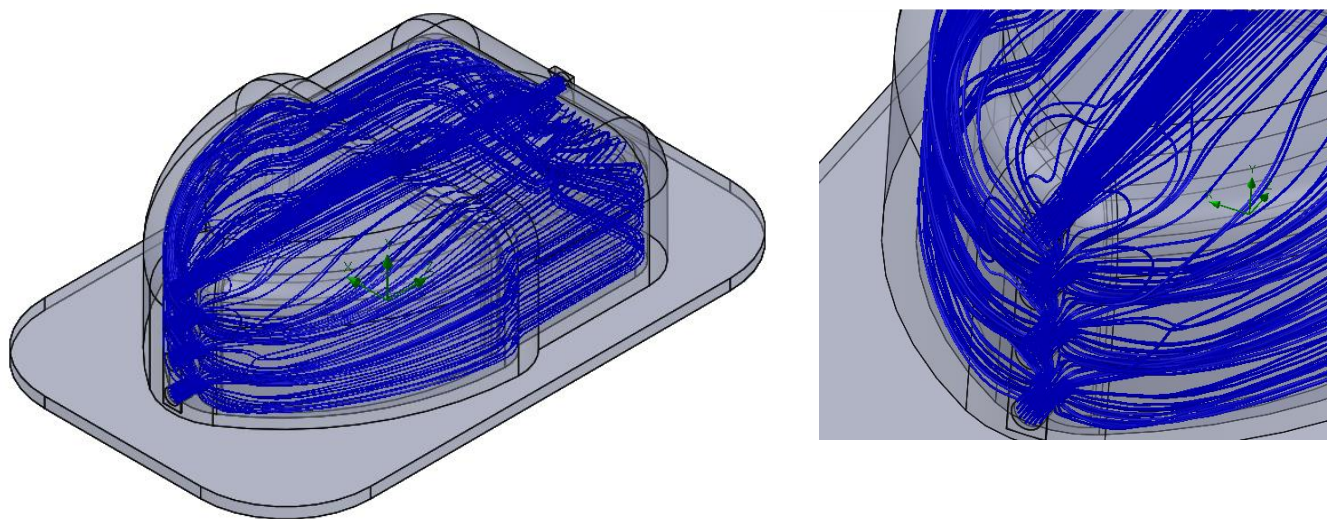
*Figura 12 - Zonas A e B para posicionamento preferencial dos furos de entrada/saída do fluido*

Em falta de melhor alternativa será aqui considerado o caudal máximo que o equipamento selecionado permite, 90l/min. O fabricante aconselha utilização de tubagens de Ø10mm, logo fará sentido considerar furos da mesma dimensão. Quanto maior o número de furos menor será a velocidade do fluido à entrada/saída, o qual irá diminuir as perdas de carga. Dada a geometria do molde é possível considerar um máximo de 3 furos, deixando espaço para o posicionamento de um respirador. Na zona de entrada, no entanto, podem ser considerados 4 furos, pois o espaço livre para tal é maior. Isto vai de encontro às necessidades pois o fluxo irá embater diretamente no molde à entrada, pelo qual fará sentido reduzir a velocidade do mesmo. O coeficiente de convecção do óleo é também menor quanto menor a velocidade. Posto isto, um maior número de furos à entrada irá contribuir para uma maior uniformidade na temperatura, pois é nessa zona que a temperatura do óleo será maior.

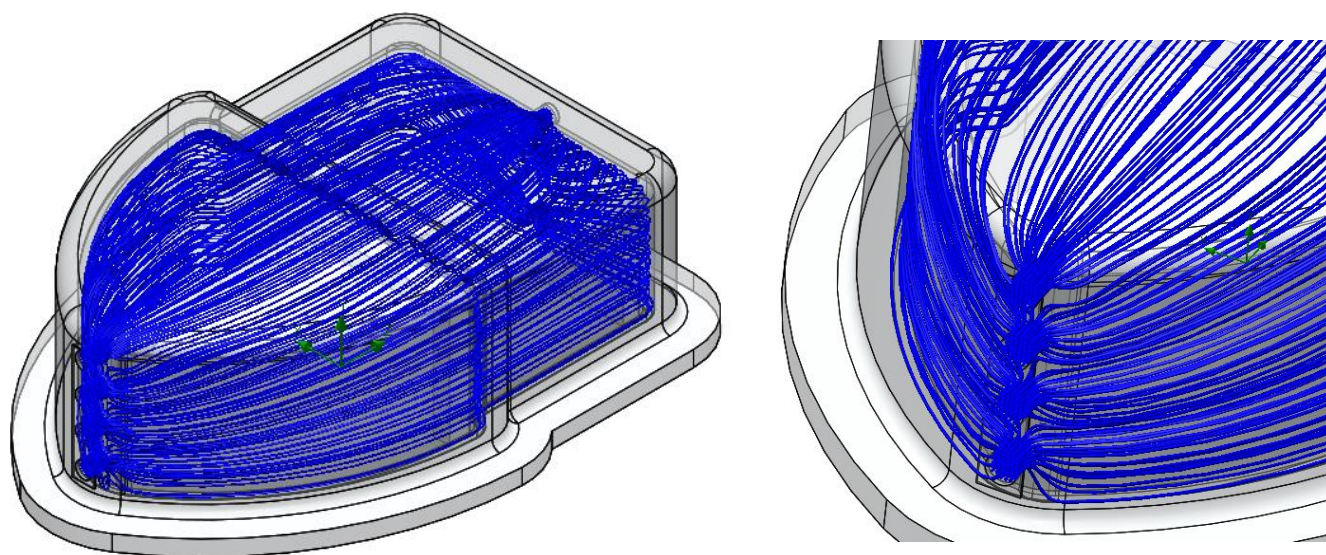
Relativamente à distância entre as paredes do molde, será desejável garantir que o escoamento seja uniforme, evitando remoinhos. Considerando as posições/diâmetro dos furos discutidas anteriormente, foram feitas várias simulações, uma delas para uma distância entre paredes de 10mm (Figura 13) e finalmente definida uma distância de 5mm entre paredes (Figura 14). Como se pode observar nas figuras seguintes, esta última distância permite uma distribuição mais uniforme do fluido no molde, o qual contribui para uma maior uniformidade térmica.

Conclui-se assim que o molde terá uma distância de 5mm entre paredes, 4 furos de Ø10mm na zona de entrada e 3 furos de Ø10mm na zona de saída. A geometria final do molde encontra-se

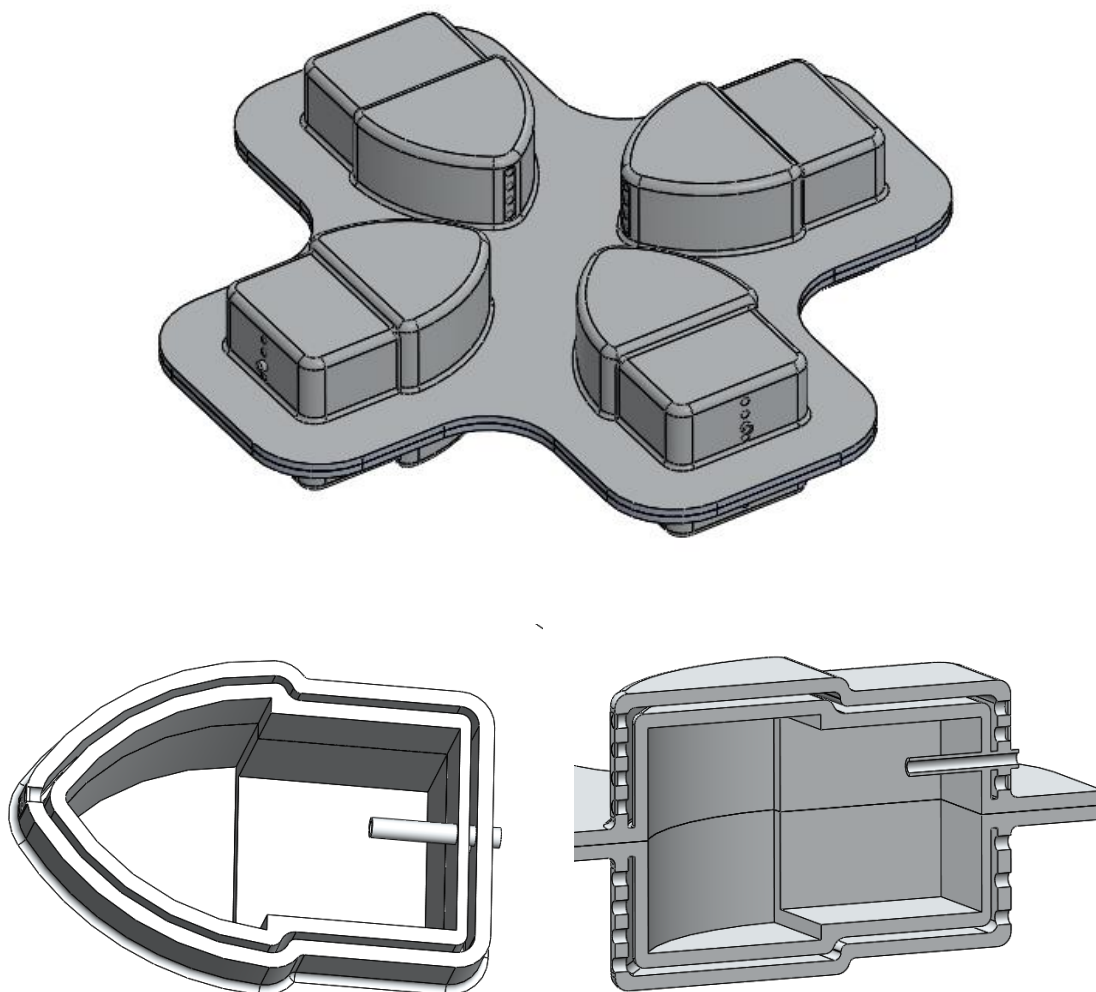
representada na Figura 15. Nas vistas de corte pode-se observar o canal único de passagem do fluido, como mencionado anteriormente. Sabe-se também que, de forma a compensar a contração do polímero durante o arrefecimento é necessário considerar as dimensões do molde 3% superiores às da peça pretendida [1].



*Figura 13 - Distribuição do fluido num molde com 10mm de distância entre paredes*



*Figura 14 - Distribuição do fluido num molde com 5mm de distância entre paredes*



*Figura 15 - Geometria final do molde e zona de passagem do fluido*

### 3.2 Respirador

Um componente muito importante dos moldes de rotomoldagem é o respirador (tubo que atravessa as paredes como pode ser observado na Figura 15). Tal como mencionado anteriormente, o processo de rotomoldagem não implica pressão no interior do molde. No entanto, o processo implica um aumento de temperatura do molde, fazendo com que o ar no seu interior sofra um aumento de volume (ou contração, no arrefecimento). O respirador permite manter a pressão ambiente, pela saída/entrada de ar no molde. Caso contrário, um aumento de pressão resultaria em deformações e tensões residuais na peça.

Assim, o respirador deverá ser dimensionado de forma a permitir a passagem de ar correspondente ao volume da expansão ou da contração referida.



É importante que este tenha comprimento suficiente para não permitir a passagem de pó de polímero para o exterior do molde, correndo o risco de entupir o respirador, para além das claras repercussões que esta falta de material teria na peça final. Por questões de segurança, é comum obturar a extremidade no interior do molde com lã de aço ao mesmo, de forma a impedir a passagem do polímero.

Existe uma relação empírica para o dimensionamento do respirador que recomenda um diâmetro de 13mm por cada metro cúbico do molde [1]. No entanto, esse dimensionamento não foi feito nesta dissertação, uma vez que o ponto de partida é um molde existente, onde são conhecidas as medidas adequadas do respirador. Para futuros moldes terá de ser considerada a diferença de volume entre os moldes propostos para esta dissertação e os moldes convencionais em rotomoldagem, uma vez que os primeiros têm um volume acrescido de cerca de 25%<sup>6</sup>.

### 3.3 Pressurização do Reservatório

A pressão de vapor é uma propriedade do fluido que especifica a pressão à qual ocorre a vaporização do mesmo, a uma dada temperatura. A título de exemplo, como se sabe, a pressão de vapor da água, a 100°C é de 1 atm.

Do princípio de Bernoulli vem que, de forma a conservar a energia total do fluido, um aumento de velocidade implica uma diminuição de pressão. Assim, para um fluido em movimento, com velocidade não uniforme pode ocorrer uma diminuição localizada da pressão, em zonas onde a velocidade aumenta. Nestas zonas, se a pressão diminuir abaixo da pressão de vapor o fluido irá vaporizar, formando pequenas bolhas de vapor. A este fenómeno é dado o nome de cavitação.

Estas bolhas podem desaparecer subitamente, ao serem deslocadas para uma zona de pressão superior, ou devido a um aumento da pressão local. Neste caso as bolhas desaparecem subitamente, sendo preenchidas pelo fluido quase instantaneamente. Este colapso das cavidades de vapor e o seu subsequente preenchimento provocam sobrepressões locais muito elevadas, por vezes da ordem dos GPa [5].

Esta variação de pressão resulta em ondas de pressão que interagindo com as paredes do molde causam um desgaste muito elevado no material, reduzindo drasticamente a sua resistência mecânica. Assim, será da maior conveniência evitar este fenómeno de forma a prolongar o tempo de vida dos moldes de rotomoldagem.

Assim, de modo a evitar que ocorra cavitação será necessário ter em conta durante o projeto que a pressão do fluido nunca deve descer abaixo da sua pressão de vapor.

---

<sup>6</sup> Os moldes desenvolvidos pela empresa têm, regra geral, 15mm de espessura. Os moldes considerados são constituídos por duas paredes de 10mm cada.

Foi concluído nas simulações iniciais desta dissertação que uma temperatura de óleo de 225°C será suficiente para assegurar o aquecimento uniforme do molde com tempos de ciclo vantajosos. Como se pode observar na Figura 16, a pressão de vapor do óleo escolhido para uma temperatura de 225°C é de 4 kPa ou 0,04 bar.

Tendo como base estes dados, conclui-se através da Figura 16 que uma pressão absoluta de 2 bar será mais do que suficiente para garantir que não ocorrerá cavitação sob circunstância alguma. Fica, no entanto, a possibilidade de diminuir a pressão caso haja necessidade de redução da espessura das paredes do molde.

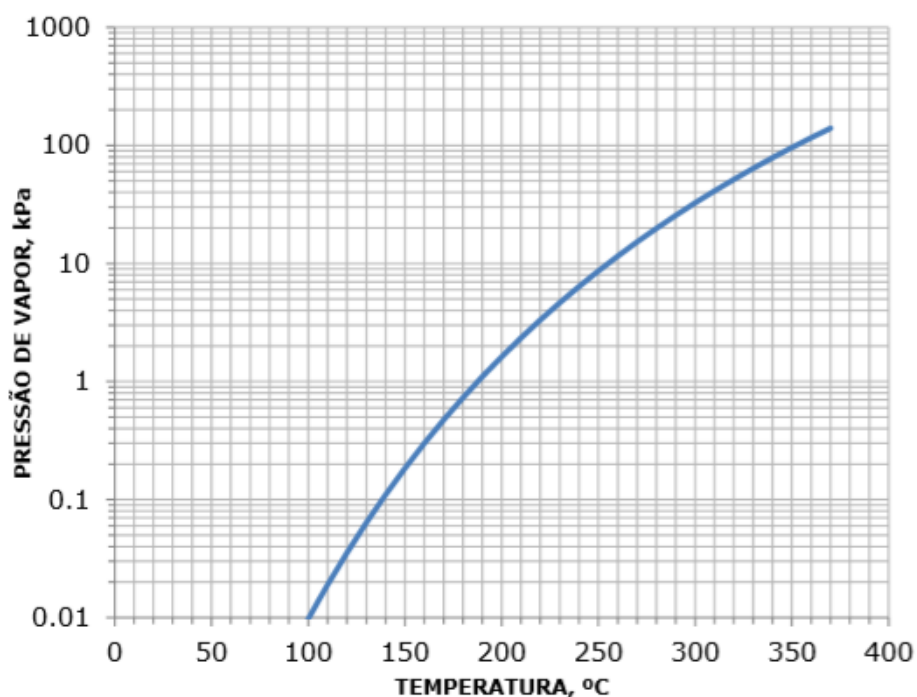


Figura 16 . Pressão de vapor do óleo Galp Termoil SY em função da sua temperatura [ANEXO 2]

## **4. Ponto de Funcionamento da Bomba**

### **4.1 Considerações Iniciais**

De forma a analisar alguns parâmetros da geometria do molde como, por exemplo, a espessura das paredes ou o tamanho / posição dos furos de entrada e saída do fluido será necessário definir qual o caudal do mesmo. Desta forma, uma vez que o equipamento escolhido para controlo de temperatura do molde, Regloplas 300LD, tem uma bomba incorporada será necessário considerar a sua curva de funcionamento e de rendimento, de forma a garantir que a bomba em questão é a mais indicada. Não foi possível obter estas informações do fornecedor, pelo qual a escolha da bomba ficará para trabalhos futuros.

Resta então determinar o gráfico de perdas de carga da instalação. Assumindo que estas se encontram maioritariamente no molde, não se consideram outros fatores influentes no cálculo das perdas de carga, para diferentes caudais.

### **4.2 Estudo das Perdas de Carga**

#### **4.2.1 Considerações Iniciais**

Para o estudo das perdas de carga, inicialmente foram realizadas simulações exploratórias com o programa SolidWorks Flow, as quais se mostraram pouco fiáveis, uma vez que empiricamente era visível a inconsistência de resultados.

Assim, foram realizados cálculos de forma a estimar as perdas de carga, as quais são localizadas, nas entradas e nas saídas, e distribuídas, ao longo do molde.

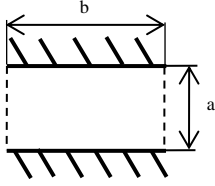
#### **4.2.2 Primeira Iteração**

No sentido de estimar as perdas de carga dentro do molde numa primeira aproximação este foi considerado como um tubo simples, recorrendo ao conceito de diâmetro hidráulico. Este relaciona a área da secção transversal,  $A$ , com o perímetro molhado,  $P$ , de forma a definir o diâmetro de um tubo cuja relação entre caudal escoado e perda de carga por atrito viscoso nas paredes é equiparável ao do molde.

Para o cálculo do mesmo foi feita uma aproximação da geometria que limita esta área, como se pode observar na Figura 17. A área escolhida foi a da secção constante do molde, pois numa primeira aproximação pode ser considerada a secção média do mesmo.

$$\varnothing_h = \frac{4A}{P} = \frac{4 * 1510}{614} = 9,8 \text{ mm} \quad (1)$$

Outra abordagem possível seria a expressão seguinte, válida para o cálculo do diâmetro hidráulico para escoamento num tubo de secção transversal retangular.



$$\varnothing_h = \frac{4ab}{2b} = 2a = 10 \text{ mm} \quad (2)$$

A partir deste momento será considerado o estudo do escoamento do fluido nesta tubagem equivalente.

Considerem-se as seguintes equações [6]

$$\Delta P = \rho g h_f \quad (3)$$

$$\Delta h_f = f \frac{L}{\varnothing} \frac{U^2}{2g} \quad (4)$$

Obtendo

$$\Delta P = f \frac{L}{\varnothing} \left( \frac{1}{2} \rho U^2 \right) \quad (5)$$

Onde  $\varnothing$  representa o diâmetro da tubagem, agora o diâmetro hidráulico, L o seu comprimento e U a velocidade do fluido, dada por

$$U = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

Sendo A a área transversal do tubo, calculada através do diâmetro hidráulico,  $A = \pi * \varnothing_h^2$

Relativamente ao comprimento da tubagem, foi considerado o cumprimento do maior caminho percorrido pelo fluido dentro do molde, cerca de 385mm (Figura 18). Não foram, ainda, consideradas as perdas de carga devidas às curvaturas derivadas da geometria do mesmo.



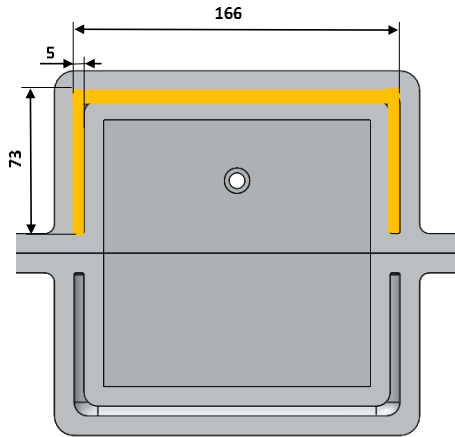


Figura 17 – Simplificação da área transversal do molde [mm]

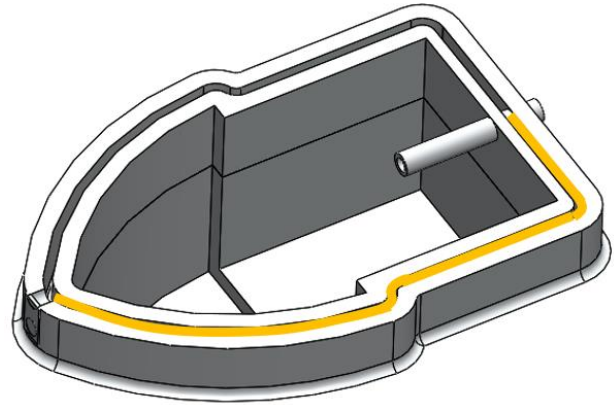


Figura 18 – Primeira aproximação do comprimento do tubo

Na equação (5) o coeficiente de atrito,  $f$ , pode ser obtido através do diagrama de Moody (Figura 19). Pode também ser obtido através da expressão seguinte, proposta por Blasius [7] é válida para tubos lisos e  $4000 < Re < 10^5$  que engloba o caso em estudo ( $Re = 1.34 \times 10^4$  para  $Q = 80 \text{ l/min}$ ). A utilização desta equação em detrimento do diagrama prende-se com a facilidade de agilização do processo de cálculo através da criação de uma folha de Excel.

$$f \cong 0,316 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (7)$$

O molde será fabricado por fresagem que, como ilustrado na Figura 20 permite acabamentos de até cerca de  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Considerando a eficiência energética do processo é necessário ter em conta que as perdas por radiação são menores quanto mais lisa for a superfície. Assim, sabendo que a emissividade do alumínio é bastante baixa para rugosidades de  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  e que este valor é viável por fresagem, conclui-se que será benéfico impor uma superfície lisa no projeto, podendo assumir a expressão de Blasius como válida no cálculo do coeficiente de perda de carga.

Sabe-se que, para um caudal de  $80 \text{ l/min}$

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (8)$$

Onde  $\nu$  representa a viscosidade cinemática do fluido.

Para dar continuação a este trabalho fará sentido avaliar se o custo acrescido de maquinagem do molde compensará as perdas acrescidas por radiação.

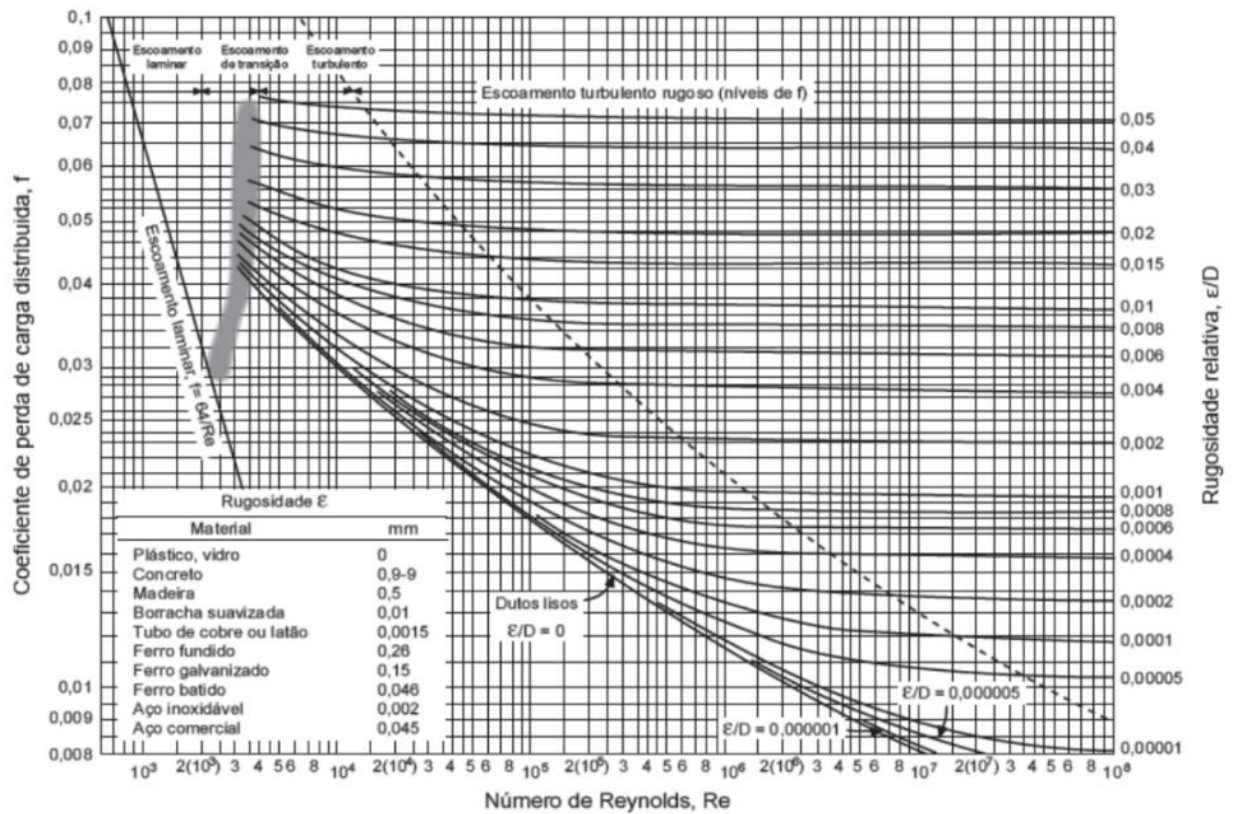


Figura 19 - Diagrama de Moody<sup>7</sup>

Grupos de rugosidades	▽				▽▽				▽▽▽				▽▽▽▽			
Rugosidade máxima valores em $Ra(\mu m)$	50				6,3				0,8				0,1			
Classes de rugosidade (GRADE)	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1				
Rugosidade máxima valores em $Ra(\mu m)$	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025				
Informações sobre os resultados de usinagem																
Serrar																
Limar																
Plainar																
Tornear																
Furar																
Rebaixar																
Alargar																
Fresar																
Brochar																
Raspar																
Retificar(frontal)																
Retificar(lateral)																
Alisar																
Superfinish																
Lapidar																
Polir																

Faixa para um desbaste superior  
 Rugosidade realizável com usinagem comum  
 Rugosidade realizável com cuidados e métodos especiais

<sup>7</sup> <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAASJIAF/diagrama-moody-mecanica-dos-fluidos> [acedido a 12/05/19]

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
~	Indica que a superfície deve permanecer bruta, sem acabamento, e as rebarbas devem ser eliminadas.
▽	Indica que a superfície deve ser desbastada. As estrias produzidas pela ferramenta podem ser percebidas pelo tato ou visão.
▽▽	Indica que a superfície deve ser alisada, apresentando dessa forma marcas pouco perceptíveis à visão.
▽▽▽	Indica que a superfície deve ser polida, e assim ficar lisa, brilhante, sem marcas visíveis.

*Figura 20 - Acabamentos superficiais<sup>8</sup>*

Finalmente, com os valores da Tabela 5 obtêm-se as perdas de carga em função do caudal representadas na Tabela 6, calculadas

*Tabela 5 - Valores considerados no cálculo das perdas de carga*

$\varnothing_h$ [mm]	$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s] a 200°C	L [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>9.8</b>	1,63	385	1030

*Tabela 6 - Perdas de carga distribuídas para diferentes caudais na gama de funcionamento da bomba*

<b>Q [l/min]</b>	<b><math>\Delta P</math> [Pa]</b>
<b>50</b>	2150,7
<b>60</b>	3097,1
<b>70</b>	4215,4
<b>80</b>	5505,9

Será também necessário contabilizar as perdas de carga localizadas, nomeadamente à entrada e saída. Sabe-se que para este tipo de singularidades estas são calculadas de acordo com a equação (9).

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \xi, \quad (9)$$

onde  $\xi$  representa o coeficiente de perda de carga singular definido consoante o tipo de singularidade, na Figura 21.

<sup>8</sup> <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAhKn0AD/966870-tabelas-acabamento-superficial> [acedido a 12/05/19]

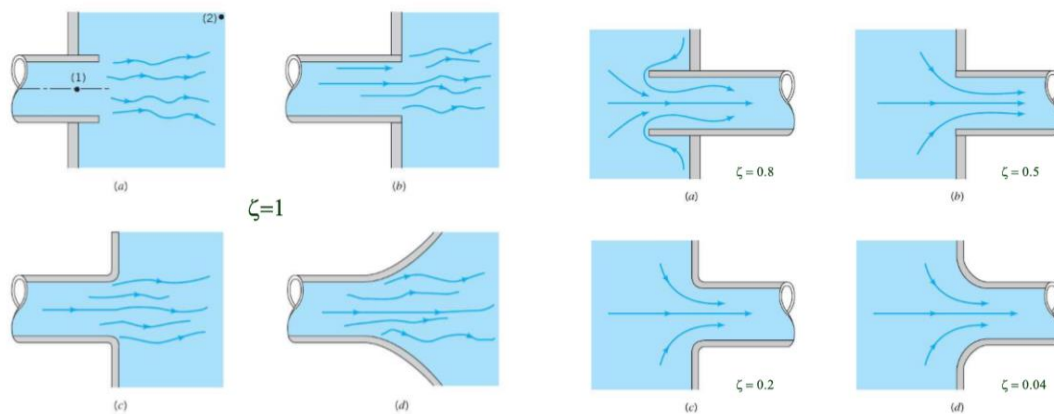


Figura 21 - Coeficiente de perda de carga singular para entradas e saídas [6]

Relativamente às perdas de carga na zona de entrada, facilmente se percebe pela Figura 21 que são independentes da sua geometria, uma vez que o coeficiente de perda de carga singular não depende desta. Os casos representados para a zona de entrada referem-se à descarga até a velocidade caís a zero, no entanto a consideração feita majora as perdas de carga, pelo qual é aceitável fazê-la. Pode-se, assim, preencher uma tabela para as perdas de carga à entrada, independentemente da sua geometria.

Assim, com base na equação (9) e nos valores da Tabela 7 foram determinadas as perdas de carga à entrada (ver Tabela 8 e à saída (ver Tabela 9) para vários caudais, considerando o diâmetro dos furos, 10mm.

Tabela 7 - Valores considerados no cálculo das perdas de carga na zona de entrada

$\xi_{entrada}$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$U$ [m <sup>2</sup> /s]
1	1030	*

\* A velocidade do fluido,  $U$ , irá depender do caudal considerado, sendo calculada através da expressão  $V = \frac{Q}{A}$ .

Tabela 8 - Perdas de carga localizadas à entrada para vários caudais na gama de funcionamento da bomba [Pa]

Caudal Total [l/min]	$\Delta P$ [Pa]
50	98,4
60	141,6
70	192,8
80	251,8

Os valores obtidos na Tabela 8 correspondem ao esperado, uma vez que aumentam com o caudal e são superiores os valores obtidos na zona de saída, como se pode ver de seguida.

Aplicando novamente a equação (9), obtém-se, para os mesmos caudais considerados anteriormente e novamente com os valores da Tabela 7, as perdas de carga à saída, na Tabela 9.

*Tabela 9 - Perdas de carga localizadas à saída para vários caudais na gama de funcionamento da bomba, em função da geometria de saída [Pa]*

<b>Caudal Total [l/min]</b>	<b><math>\xi = 0,5</math></b>	<b><math>\xi = 0,2</math></b>	<b><math>\xi = 0,04</math></b>
<b>50</b>	49,2	19,7	3,9
<b>60</b>	70,8	28,3	5,7
<b>70</b>	96,4	38,6	7,7
<b>80</b>	125,9	50,4	10,1

Os valores da Tabela 9 correspondem ao esperado. As perdas de carga são maiores no caso em que existe uma aresta viva entre a entrada e a parede do molde, sendo menores quanto mais suave for a transição. São também maiores quanto maior o caudal, como seria de esperar.

Fará sentido posteriormente um estudo do custo acrescido da maquinaria de um chanfro ou boleado nessas zonas *versus* o benefício obtido através da redução da perda de carga.

É importante salientar que para estes cálculos foi considerado o seguinte, em função da zona em questão:

- À entrada foi considerado o caudal total, dividido pelo número de moldes e pelo número de metades de molde, 8. Assim, sendo que cada metade do molde tem 4 entradas, o valor utilizado nos cálculos deverá ser  $\frac{Q}{4*8}$ .
- Ao longo do tubo foi considerado o caudal total passante numa metade do molde, pois foi considerada toda a secção do mesmo. Foi então utilizado o caudal total, dividido pelo número de metades,  $\frac{Q}{4*2}$ .
- À saída, de modo análogo ao que foi feito à entrada, foi considerado o caudal total, dividido pelo número de moldes e o número de saídas em cada molde. Assim, sendo que cada metade do molde tem 3 saídas, foi considerado  $\frac{Q}{4*6}$ .

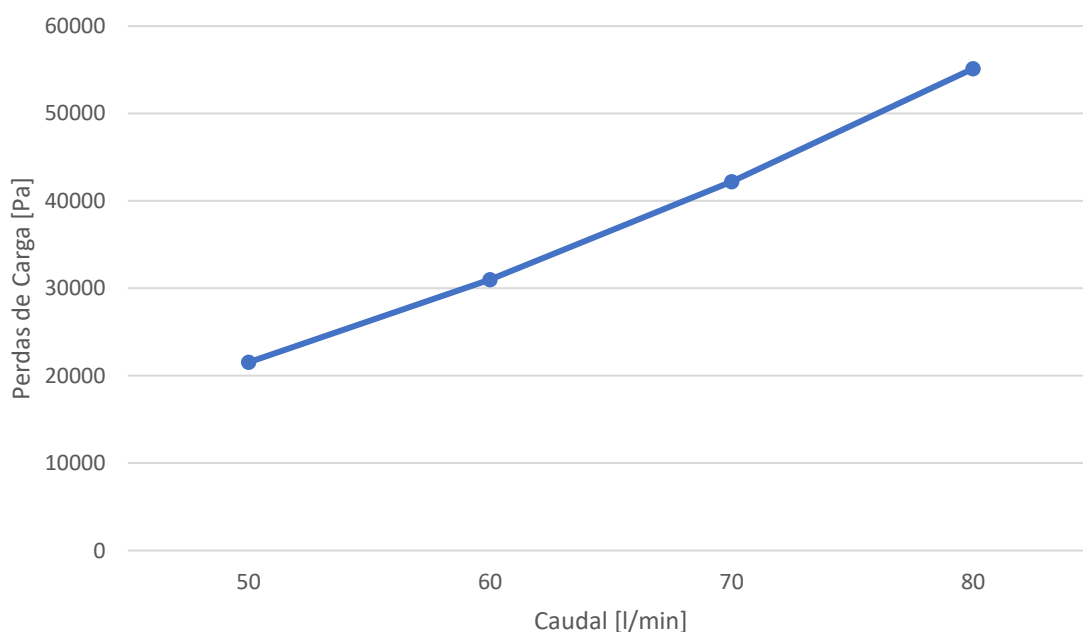
Com base no mencionado anteriormente, os valores obtidos à entrada e saída serão as perdas por furo, tendo de ser multiplicadas pelo número de furos. Somando agora todas as perdas de carga no molde obtém-se, assumindo a inexistência de boleados ou chanfros nos furos de entrada / saída,  $\xi =$

0,5 , as perdas de carga para alguns caudais expressas na Tabela 10. É de salientar que, se acordo com o caudal considerado para cada cálculo, explicado na página anterior, as perdas da tabela seguinte referem-se a cada metade de molde, pelo qual deverão ser multiplicadas por 8 para obter o gráfico da Figura 22.

*Tabela 10 - Perdas de carga totais para alguns caudais na gama de funcionamento da bomba*

<b>Caudal Total [l/min]</b>	<b>Perdas Totais [Pa]</b>
<b>50</b>	2691,9
<b>60</b>	3875,9
<b>70</b>	5275,8
<b>80</b>	6890,8

Assim é possível traçar o gráfico de perdas de carga da instalação, desprezando as perdas fora do molde, na Figura 22.



*Figura 22 - Gráfico das perdas de carga do molde*

Tendo como base estes dados, deverá ser consultado o fornecedor equipamento, de forma a perceber qual a possibilidade de adaptação da bomba presente no equipamento aos requisitos do projeto.

## 5. Estudo das Deformações no Molde

Resta agora determinar qual a espessura das paredes do molde. Esta deverá ser o menor possível, de forma a minimizar a massa do molde e consequentemente a energia necessária para o aquecer, mas deverá suportar as cargas aplicadas e apresentar rigidez para evitar deformações.

### 5.1 Deformação Devido à Pressão

Dada a natureza do processo de rotomoldagem, a pressão no interior do molde (superfície em contacto com o polímero) é nula. Ao contrário do processo de injeção, o polímero é inserido no molde mantendo a pressão ambiente no seu interior. A manutenção desta pressão ambiente deverá ser garantida pelo respirador, como foi referido anteriormente.

Estabelece-se assim que o interior do molde não estará sujeito a pressões. Resta então considerar a pressão aplicada pelo fluido nas paredes que o contêm.

Foi decidido, no capítulo 3 que o fluido térmico - óleo - circula num circuito fechado e pressurizado a 2 bar, por forma a evitar cavitação.

Foram, então, realizadas simulações no software SolidWorks Flow de forma a perceber quais as deformações resultantes dessa pressão de 2 bar.

É importante salientar que para obter estas simulações foram feitas algumas simplificações

- Pressão única, aplicada manualmente, pois não foi possível importar resultados da simulação SolidWorks Flow (as perdas são desprezáveis),
- Temperatura uniforme de 200°C,
- Fixação das ‘abas’ como condição fronteira, pois se estas deformarem o molde deixa de estar vedado.

Outro fator de extrema importância prende-se com a utilização do software, uma vez que este não considera a pressão ambiente no exterior, como se o molde estivesse no vácuo. Assim, de forma a obter resultados que se ajustem à realidade deverá ser considerada uma pressão externa de 1 bar, para além da interna de 2bar. Assim, foi aplicada uma resultante de 1 bar nas paredes do molde em contacto com o fluido. O material utilizado nas simulações foi Alumínio 1060, disponível na base de materiais do software.

Estas simulações foram realizadas apenas em metade do molde, considerando a sua simetria, por forma a simplificar e agilizar o processo de simulação.



Analisando os resultados obtidos na Figura 23 percebe-se que a maior deformação ocorrerá na zona superior do molde. A geometria da zona justifica este facto, pois esta é a maior zona não apoiada e por se tratar de uma placa plana, ao contrário da zona curva de entrada, onde a deformação não se faz notar tanto.

Neste caso não houve necessidade de estudar a convergência da malha uma vez que para poder aplicar uma temperatura de 200°C em todas as faces foi necessário usar uma malha bastante refinada. Isto prende-se com a existência de faces muito pequenas que necessitam de elementos do mesmo tamanho.

Tendo como objetivo a verificação da ordem de grandeza dos valores obtidos nas simulações da Figura 23 foi utilizada a teoria das placas planas. De forma a aproximar as dimensões da placa plana à realidade, foi considerada uma placa de largura igual à do molde e a área igual à das superfícies superiores do mesmo, onde ocorre a deformação máxima, Figura 25. Para  $a = 200mm$  e  $A = 40000mm^2$  vem  $b = 200mm$ .

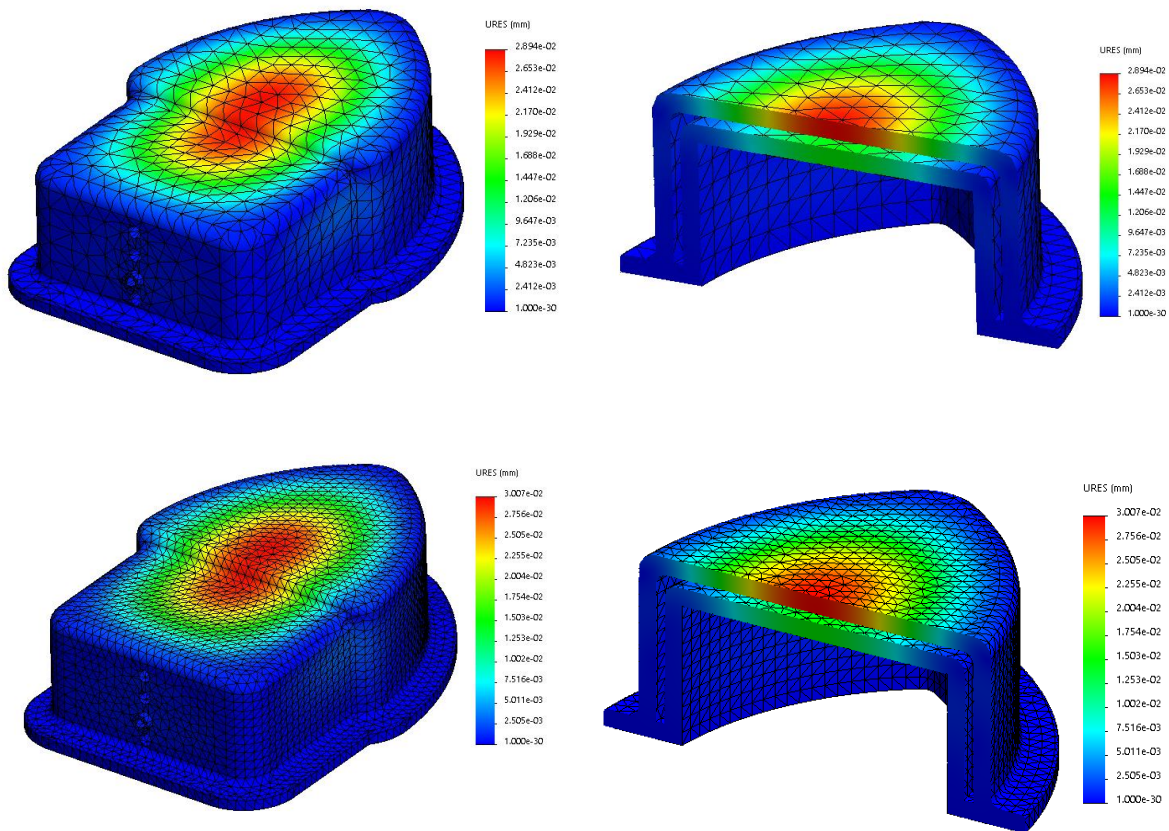


Figura 23 - Deformações provocadas no molde por uma pressão absoluta interna de 2 bar



A deformação numa placa de largura  $a$ , comprimento  $b$  e espessura  $h$ , simplesmente apoiada e sujeita a uma carga distribuída é dada pela equação (10) [8].

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_{mn}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (10)$$

sendo

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (11)$$

E

$$p_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^b \int_0^a p(x, y) \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dx dy \quad (12)$$

A equação acima pode ser resolvida para uma placa quadrada,  $a = b$ , sujeita a um carregamento uniforme,  $p_0$ .

$$p_{mn} = \frac{4}{a^2} \int_0^b \int_0^a p_0 \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{a}\right) dx dy \quad (13)$$

$$(=) p_{mn} = \frac{4}{a^2} p_0 \int_0^a \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \int_0^b \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{a}\right) dy \quad (14)$$

$$(=) p_{mn} = \frac{4}{a^2} p_0 \left[ -\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \frac{a}{m\pi} \right]_0^a \left[ -\cos\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \frac{b}{n\pi} \right]_0^b \quad (15)$$

$$(=) p_{mn} = \frac{4}{a^2} p_0 \frac{a}{m\pi} \frac{a}{n\pi} (1 - \cos(m\pi))(1 - \cos(n\pi)) \quad (16)$$

A equação acima tomará valores diferentes para valores pares ou ímpares de  $m$  e  $n$  ( $m, n=0, 1, 2, 3, \dots$ ) sendo o pior caso para valores ímpares, onde fica

$$p_{mn} = \frac{16 p_0}{mn\pi^2} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (10) obtém-se uma expressão para o cálculo da deformação máxima de uma placa plana quadrada, simplesmente apoiada e sujeita a um carregamento uniforme, sabendo que a sua deformação máxima ocorrerá no centro da mesma ( $x = y = \frac{a}{2}$ )

$$w_{max} = \frac{p_0 a^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{\pi^6 mn(m^2 + n^2)^2} \quad (18)$$

A placa considerada, Figura 26, terá dimensões de 200x200x10 mm. Da Figura 24 vem que, para uma temperatura de 200°C, o modulo de Young desce para cerca de 92% do seu valor à temperatura ambiente, ou seja 64,4 GPa.

Tem-se, assim

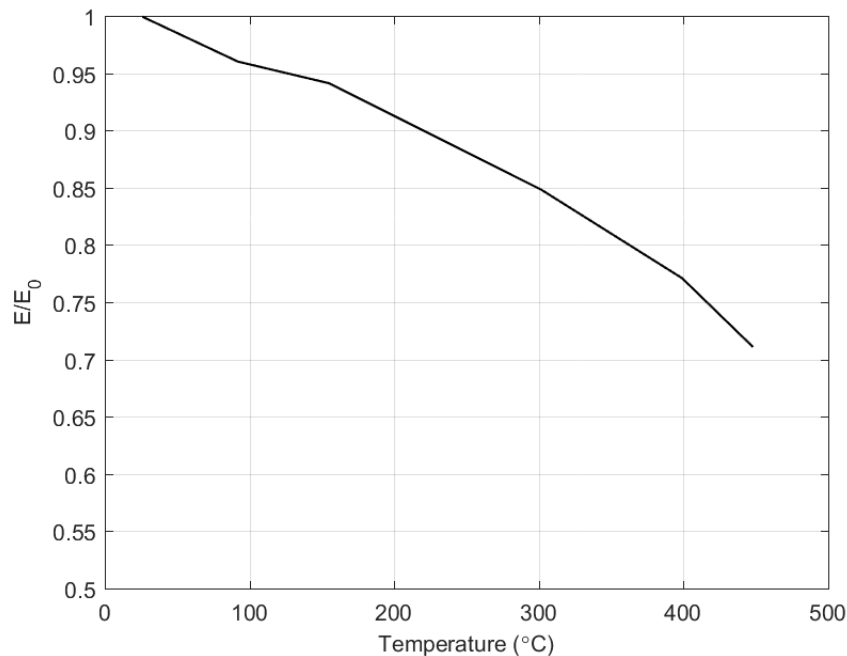
*Tabela 11 - Valores utilizados no cálculo da deformação máxima*

$p_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	E [GPa]	a [mm]	h [mm]
$1 \times 10^5$	64,4	200	10

Onde  $q_0$  representa um carregamento distribuído de 1 bar.

Através das equações indicadas e dos valores da Tabela 11 foi calculado um deslocamento máximo de 0,11mm. Observando a equação (18) facilmente se percebe que a parcela do somatório diminuirá à medida que o valor de  $m$  e  $n$  aumenta. Assim, foram considerados valores de  $m$  e  $n$  até 5, pois acima disto são desprezáveis.

Este valor vai de encontro ao obtido na Figura 23 através do SolidWorks, confirmando-o. A diferença entre ambos poderá estar relacionada com as várias simplificações consideradas em ambos métodos, como o facto de no Solidworks ter sido considerada encastrada a aba que une as metades do molde.



*Figura 24 - Variação do modulo de Young com a temperatura para o alumínio [9]*

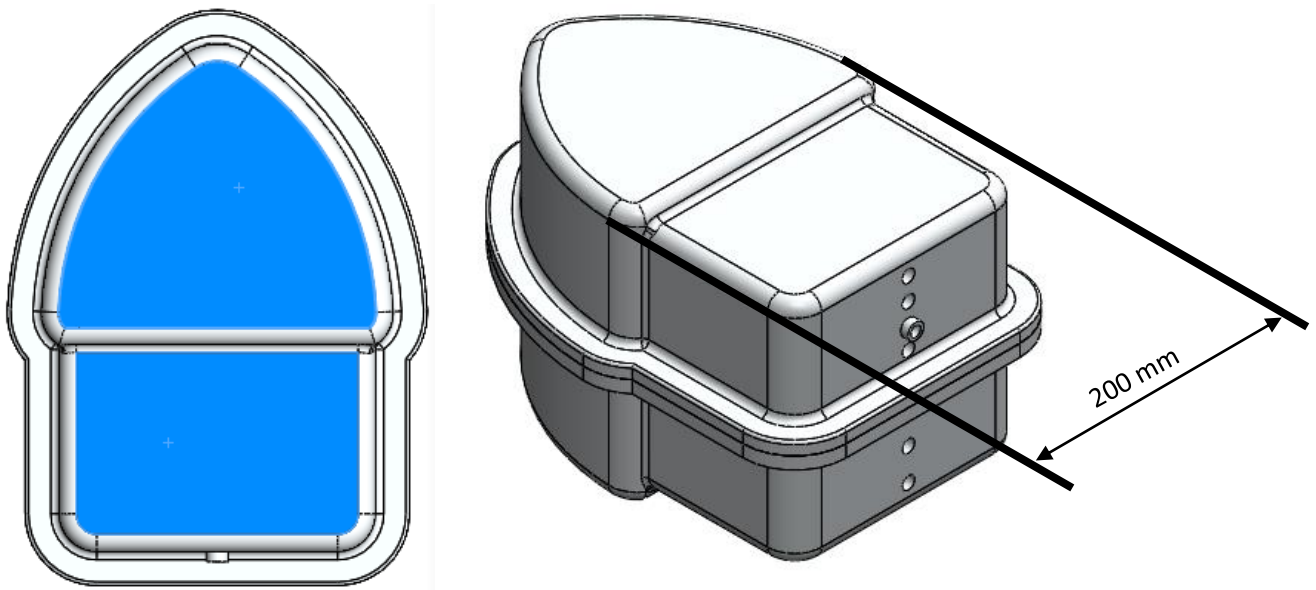


Figura 25 - Área superficial considerada e largura do molde

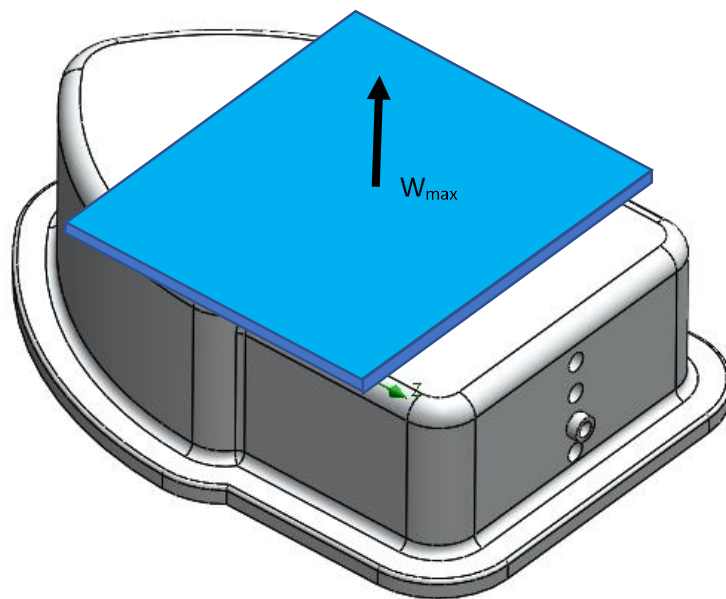


Figura 26 – Placa plana equivalente, considerada no cálculo da deformação máxima.

## 5.2 Dilatação Térmica

Uma vez que a temperatura no molde não é uniforme ao longo do processo de aquecimento do mesmo será interessante analisar a sua deformação devido ao gradiente de temperatura. Para isto foram analisados vários instantes do aquecimento com o objetivo de determinar o maior gradiente de temperatura, pois será este o pior caso, em termos de deformação. Na Figura 27, obtida das simulações efetuadas em SolidWorks Flow, pode-se observar a diferença máxima de temperatura entre dois pontos na superfície interior do molde (em contacto com o polímero) em função do tempo, para diferentes caudais, donde se pode concluir que esta terá um valor máximo de cerca de 55°C. Sabe-se que quanto maior a diferença de temperaturas dentro do molde menos uniforme será a distribuição do polímero no molde. Esta diferença de temperatura irá também causar dilatação do material, que pode ser calculada através da fórmula seguinte

$$\Delta L = \beta \cdot L \cdot \Delta T = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,25 \cdot 55 = 2,8 \cdot 10^{-4} m \quad (19)$$

sendo  $\beta$  o coeficiente de dilatação térmica do alumínio, cerca de  $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e L o comprimento entre o qual se dá a diferença de temperatura,  $\Delta T$ . Este comprimento encontra-se representado na Figura 28.

Este valor é muito pequeno face ao comprimento considerado, pelo qual se pode concluir que os seus efeitos serão desprezáveis. Relativamente à fadiga também se pode concluir que pode ser desprezada, pois os tempos de ciclo e número de ciclos assim o permitem, dada a natureza do processo de rotomoldagem, que é adequado à produção de séries relativamente pequenas de peças, geralmente menos de 10000 por ano e com tempos de ciclo longos, na ordem dos 10 minutos ou mais.

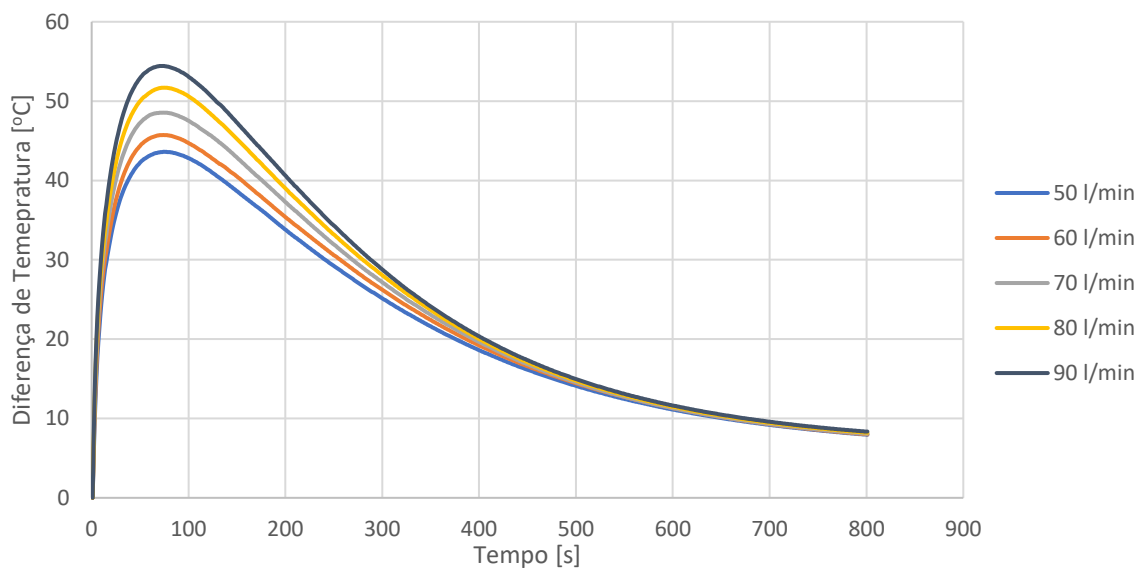
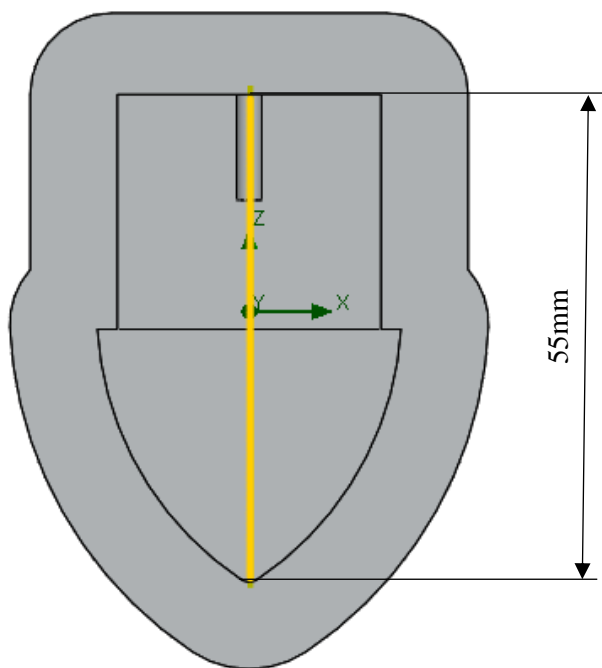


Figura 27 - Diferença máxima de temperatura para vários caudais

É de notar que esta diferença de temperatura irá variar de acordo com a solução escolhida para o aquecimento. Como será referido adiante nesta dissertação foi apontado um interesse para a utilização de circuitos de óleo quente e frio independentes. Optando por esta solução cria-se a hipótese de programar no equipamento de controlo de temperatura uma fase de transição, de forma a tornar o aquecimento / arrefecimento do molde mais gradual na fase inicial, atenuando a curva da Figura 27.

Relativamente à Figura 27 é também importante salientar que os seus valores não representam totalmente a realidade, devido a simplificações utilizadas nas simulações, mencionadas no capítulo seguinte. Será previsível que a variação de temperatura não seja tão acentuada, no entanto os cálculos aqui realizados encontram-se do lado da segurança.



*Figura 28 - Distância entre os pontos de maior e menor temperatura.*



# 6. Tempos de Aquecimento e Arrefecimento

## 6.1 Simplificações de Simulação

Como mencionado anteriormente, as simulações efetuadas em SolidWorks contam com algumas simplificações, que se encontram listadas neste capítulo. No entanto não é expectável que estas alterem os resultados de tal forma que estes deixem de representar a realidade na maioria dos casos. Por outro lado, dada a natureza do processo de rotomoldagem, sabe-se que este terá sempre de ser afinado numa fase posterior, por tentativa-erro. Assim, os resultados obtidos nesta fase serão apenas valores de referência, podendo variar um pouco em termos de tempo e temperatura.

As simplificações em questão são as seguintes:

- Não foi considerada a gravidade, nem os efeitos da rotação do molde no fluxo do óleo, no entanto uma vez que se trata de um circuito fechado e pressurizado estes efeitos podem ser desprezados.
- Para as simulações de aquecimento e de arrefecimento foram consideradas temperaturas iniciais do molde constantes de 40°C e de 200°C, respetivamente. Isto não é completamente real devido à distribuição não completamente uniforme de temperatura do molde. No entanto são variações muito pequenas e, portanto, desprezáveis.
- Foi assumida uma temperatura inicial do óleo de 225°C no aquecimento e de 20°C no arrefecimento, o qual não vai totalmente de encontro à realidade, pois este leva uns segundos a aquecer/arrefecer. Este fator irá certamente alterar a distribuição de temperaturas no molde, mas fá-lo-á de forma positiva, uniformizando-as.
- Foi considerado óleo à pressão ambiente no estudo do tempo de ciclo, uma vez que o software demonstrou resultados pouco fiáveis quando essa variável foi introduzida. Esta simplificação do problema não irá, no entanto, afetar o aquecimento, pelo qual é aceitável que seja feita.

Tal como foi referido anteriormente, o processo de rotomoldagem é bastante empírico, podendo qualquer alteração dos resultados ser compensada experimentalmente à posteriori.

## 6.2 Resultados do SolidWorks Flow

Por forma a obter os resultados apresentados foi necessário proceder aos passos seguintes:

1. Iniciar novo estudo através da função *Wizard*, onde são definidos os seguintes parâmetros
  - Unidades de medida pretendidas.
  - Fluido e sólido a considerar.
  - Existência, ou não, de perdas por convecção e radiação e os respetivos coeficientes.
  - Tipo de simulação a realizar (estado estacionário ou transiente) e o intervalo de tempo a considerar, caso aplicável.
  - Condições ambiente e temperatura inicial do sólido.
2. Definir tampas (*lids*) de forma a tornar o molde estanque, definindo o volume de controlo.
3. Indicar condições fronteira, nas faces interiores das tampas.
  - Caudal e temperatura de entrada.
  - Pressão à saída (de forma a obter resultados fiáveis foi determinado que esta terá de ser a pressão ambiente, apesar de isto não representar totalmente a realidade, não se prevê, no entanto, que altere os resultados térmicos).
4. Definir o nível de refinamento da malha.
5. Correr a simulação.

Foi feito um estudo da forma como o nível de refinamento da malha afetava os resultados, em comparação com o tempo necessário para realizar as simulações. Primeiro foi feita uma simulação com um nível 3/6 e de seguida 1/6 e 6/6. Os tempos de simulação foram de cerca de 90, 30 e 300 minutos, respetivamente. As temperaturas obtidas não variam muito com a malha, o qual não se pode dizer do tempo de simulação. Assim, optou-se por um nível de refinamento de malha médio, de forma a diminuir o tempo de simulação, não comprometendo os resultados.

Nas simulações apresentadas nos próximos capítulos foram consideradas as seguintes condições

*Tabela 12 – Condições consideradas nas simulações em SolidWorks Flow*

	$T_{\text{fluido}} [^{\circ}\text{C}]$	Caudal [l/min]	Tempo [s]
<b>Aquecimento</b>	225	50	720
<b>Arrefecimento</b>	20	50	600



### 6.2.1 Aquecimento

Na Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 34 pode-se observar a variação das temperaturas média, máxima e mínima no interior do molde em função do tempo, assim como a diferença máxima de temperaturas entre os pontos mais ‘frio’ e ‘quente’ do molde, para cada instante. Estas informações serão importantes na definição do tempo de ciclo, assim como no estudo da uniformidade de distribuição do polímero no molde, ou seja, a uniformidade de espessura da peça obtida.

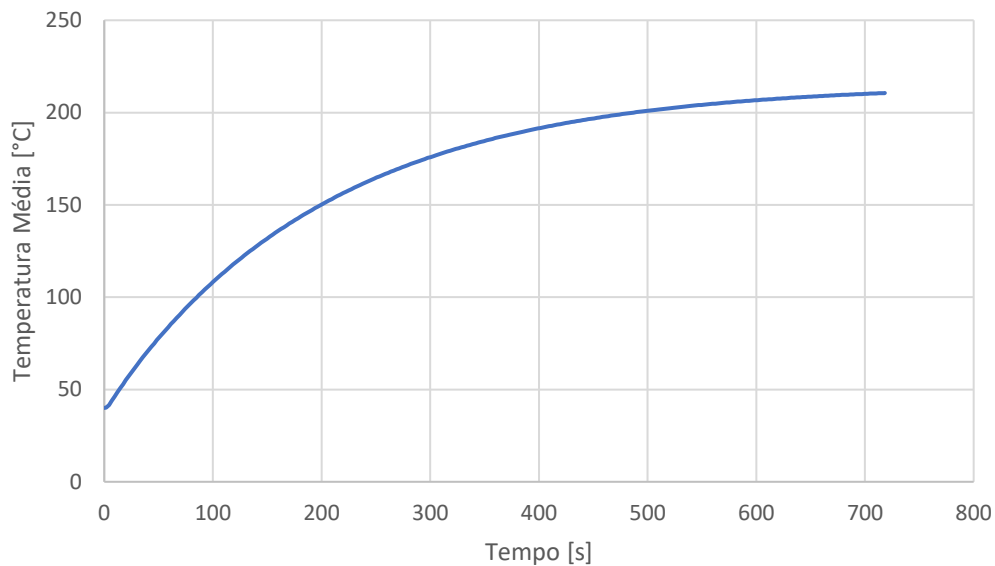


Figura 29 - Temperatura média da superfície interna do molde em função do tempo - SolidWorks

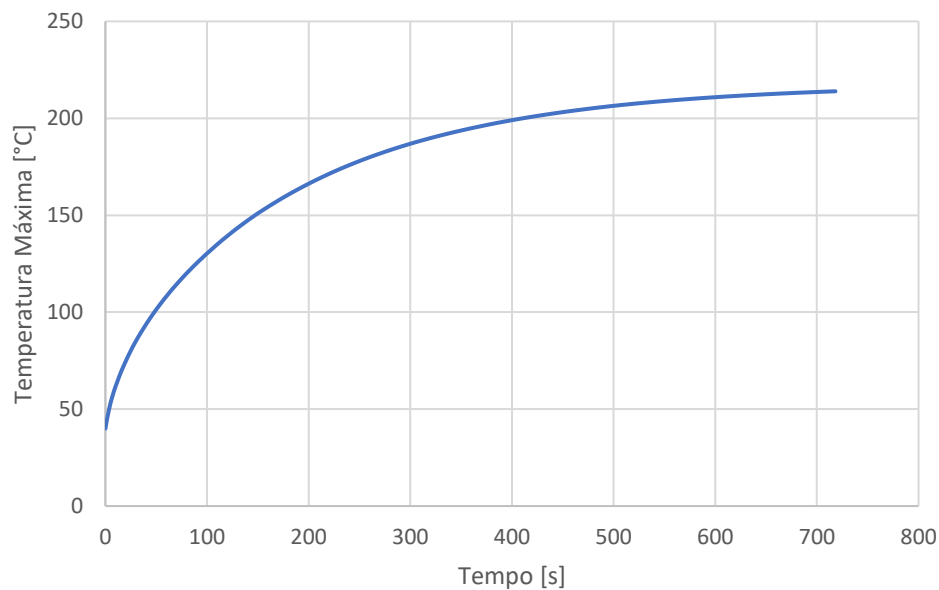


Figura 30 - Temperatura Máxima da superfície interna do molde em função do tempo - SolidWorks

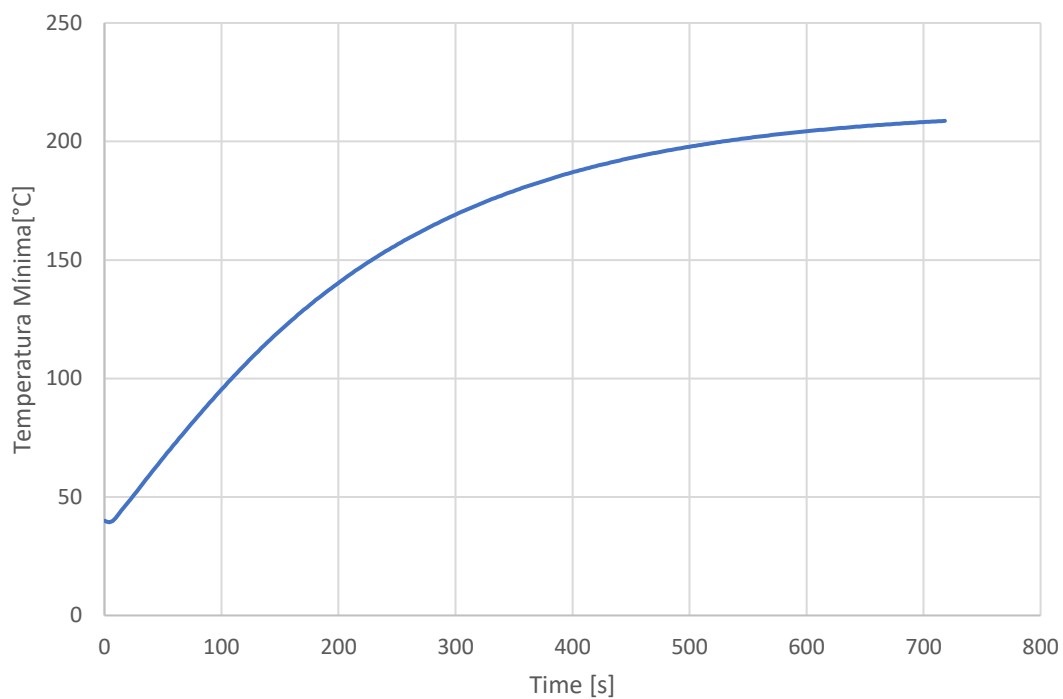


Figura 31 - Temperatura mínima da superfície interior do molde em função do tempo - SolidWorks

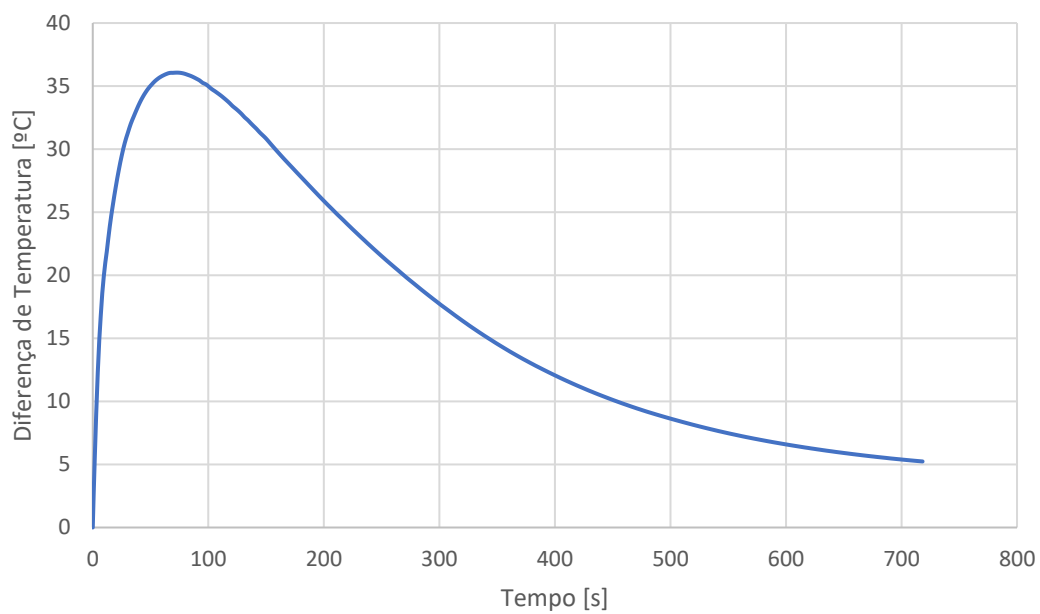


Figura 32 - Diferença de temperatura no molde em função do tempo na fase de aquecimento - SolidWorks

Foi estudada a diferença máxima de temperatura no molde para vários caudais, na Figura 34. Pode-se concluir que esta é menor quanto menor o caudal, o qual se pode justificar com a diminuição do coeficiente de convecção em função do mesmo, Figura 33. É importante salientar que os valores da Figura 34 serão superiores à realidade, pois as simulações em SolidWorks não preveem um tempo de aquecimento do óleo, considerando que este entra imediatamente no molde a 225°C, o qual não representa a realidade.

Não foi possível obter dados relativamente à diferença máxima permissível de forma a não comprometer a qualidade da peça. No entanto este método é bastante flexível e as temperaturas poderão ser uniformizadas através de uma diminuição do caudal, à custa do tempo de ciclo, ou uma reconfiguração dos pontos de entrada e saída do óleo.

Por outro lado, como é mencionado na secção 5.2, se houver necessidade, esta diferença de temperaturas pode ser diminuída programando o equipamento de controlo de temperatura do óleo para incluir uma fase de transição, de modo a uniformizar a temperatura do molde.

Dada a natureza do processo de rotomoldagem esta diferença de temperatura irá afetar a qualidade da peça, pois o polímero em pó irá depositar-se mais nas zonas mais quentes, comprometendo a uniformidade da espessura da peça. Como foi mencionado anteriormente, a uniformização da temperatura terá uma influência negativa no tempo de ciclo. Assim, terá de ser feito um estudo da qualidade *versus* produtividade, de modo a perceber qual a diferença máxima de temperatura permissível. Este valor poderá até variar consoante a peça em questão, sendo maior para peças com tolerâncias maiores, permitindo um tempo de ciclo menor, e inferior para peças que exijam mais precisão, aumentando o tempo de ciclo.

Na Figura 34, obtida através do método analítico apresentado mais tarde neste capítulo pode-se observar que uma diminuição do caudal de 90 para 50 l/min implica uma redução da diferença de temperatura de 10°C. Por outro lado, de acordo com a Figura 36 esta redução do caudal implica um aumento do tempo de aquecimento em menos de 1 minuto.

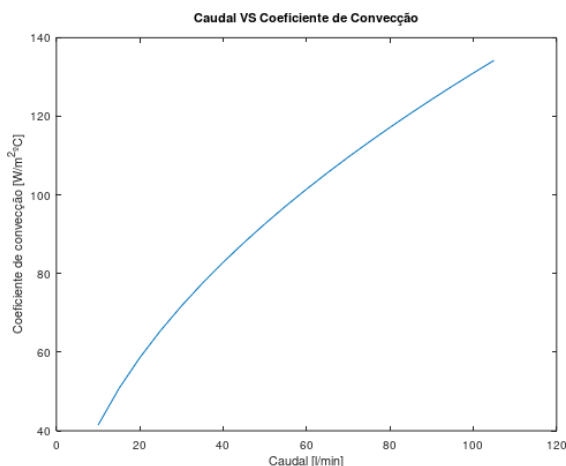


Figura 33 - Aumento do coeficiente de convecção do óleo com o aumento do caudal

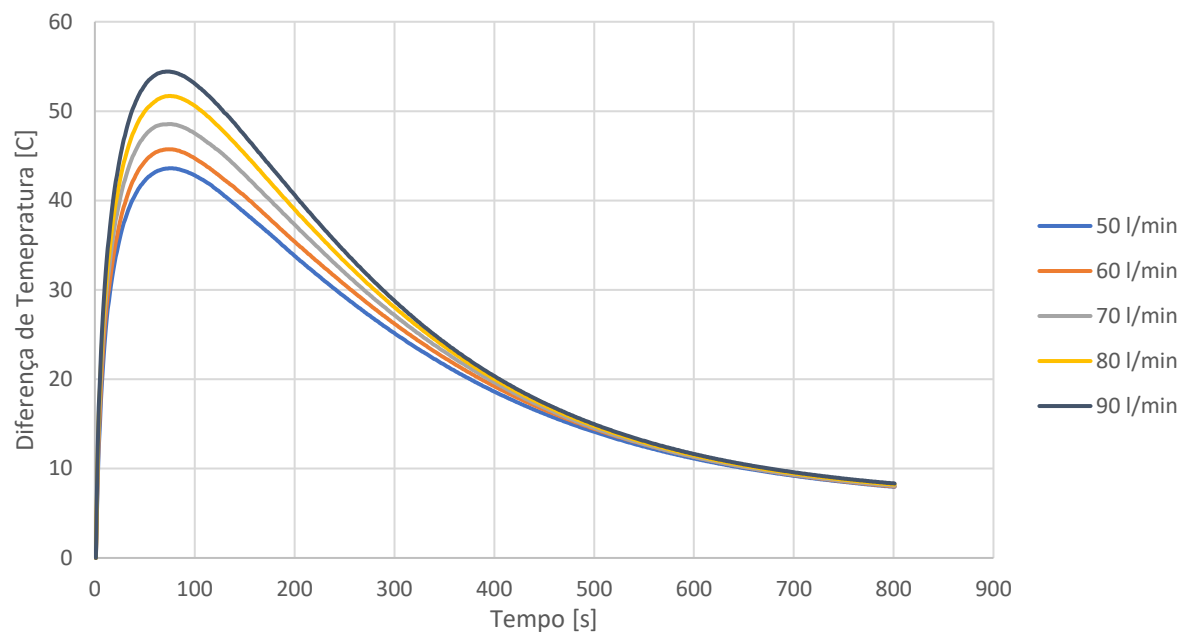


Figura 34 - Diferença máxima de temperatura no molde em função do tempo

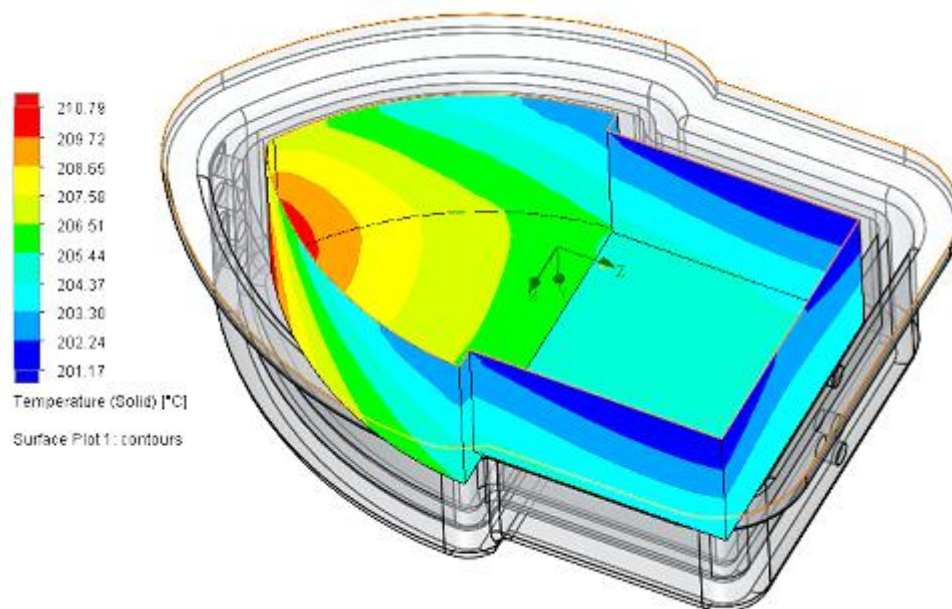
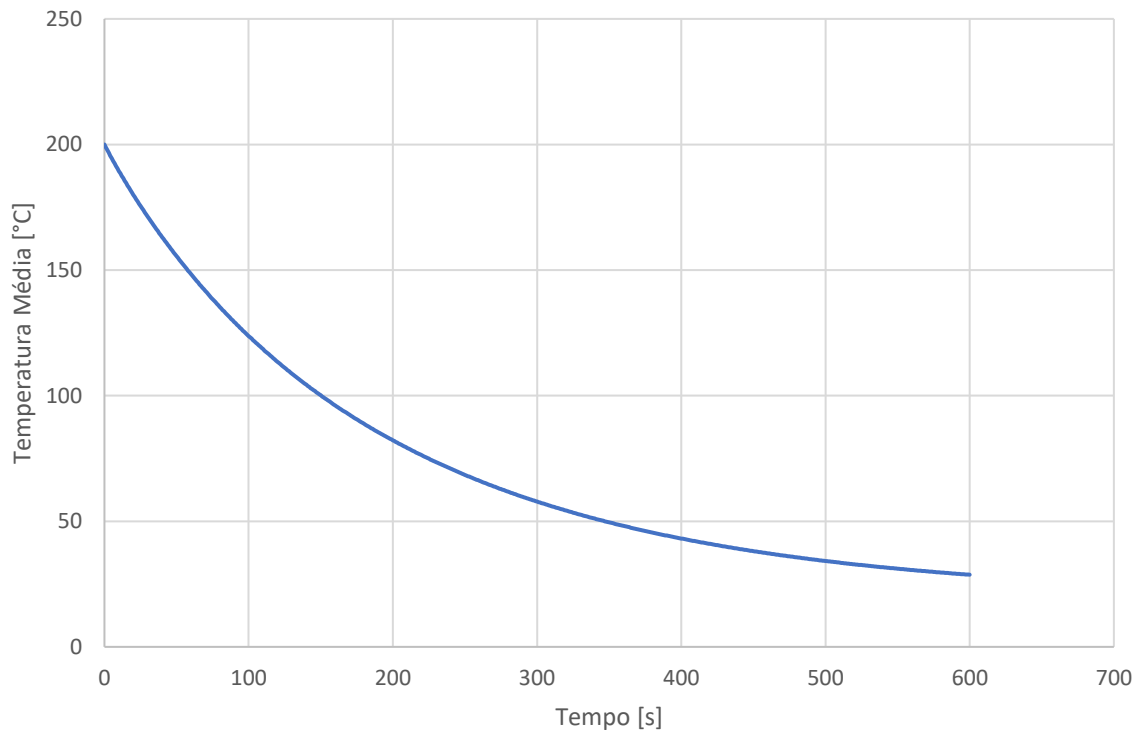


Figura 35 - Distribuição da temperatura no molde passados 9 minutos

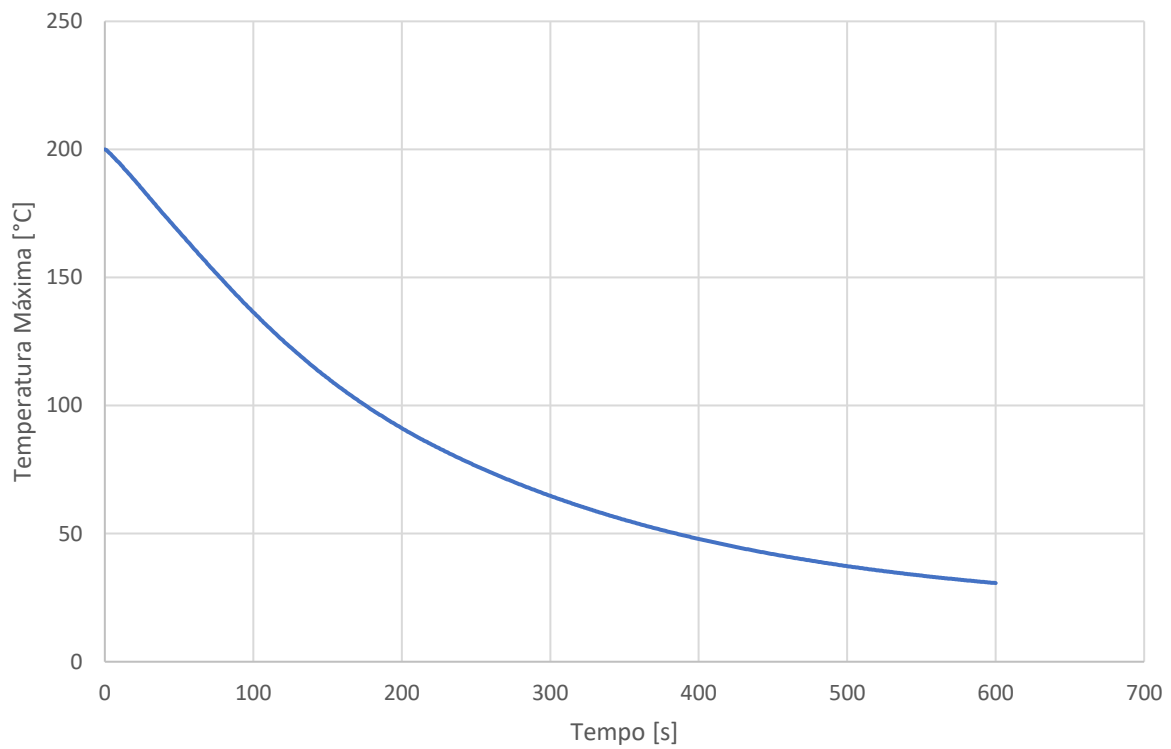
### 6.2.2 Arrefecimento

Na Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39 pode-se observar a variação das temperaturas média, máxima e mínima no interior do molde em função do tempo, assim como a diferença máxima de temperaturas entre os pontos mais ‘frio’ e ‘quente’ do molde, para cada instante. Estas informações serão importantes na definição do tempo de ciclo, assim como no estudo da uniformidade de distribuição do polímero no molde, ou seja, a uniformidade de espessura da peça obtida.

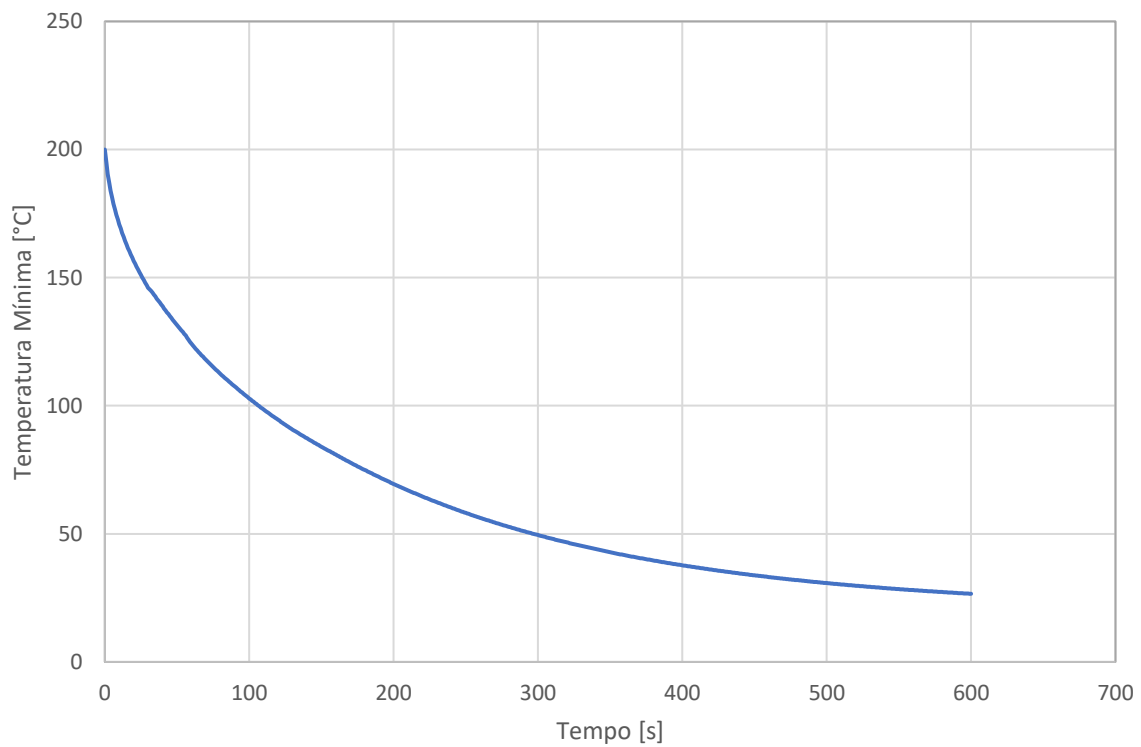
Na Figura 40 pode-se observar a distribuição de temperaturas na superfície interior do molde, em contacto com o polímero, passados 7 minutos.



*Figura 36 - Temperatura média da superfície interna do molde em função do tempo – com base em dados provenientes da simulação no SolidWorks*



*Figura 37 - Temperatura Máxima da superfície interna do molde em função do tempo – SolidWorks*



*Figura 38 – Temperatura mínima da superfície interna do molde em função do tempo – SolidWorks*

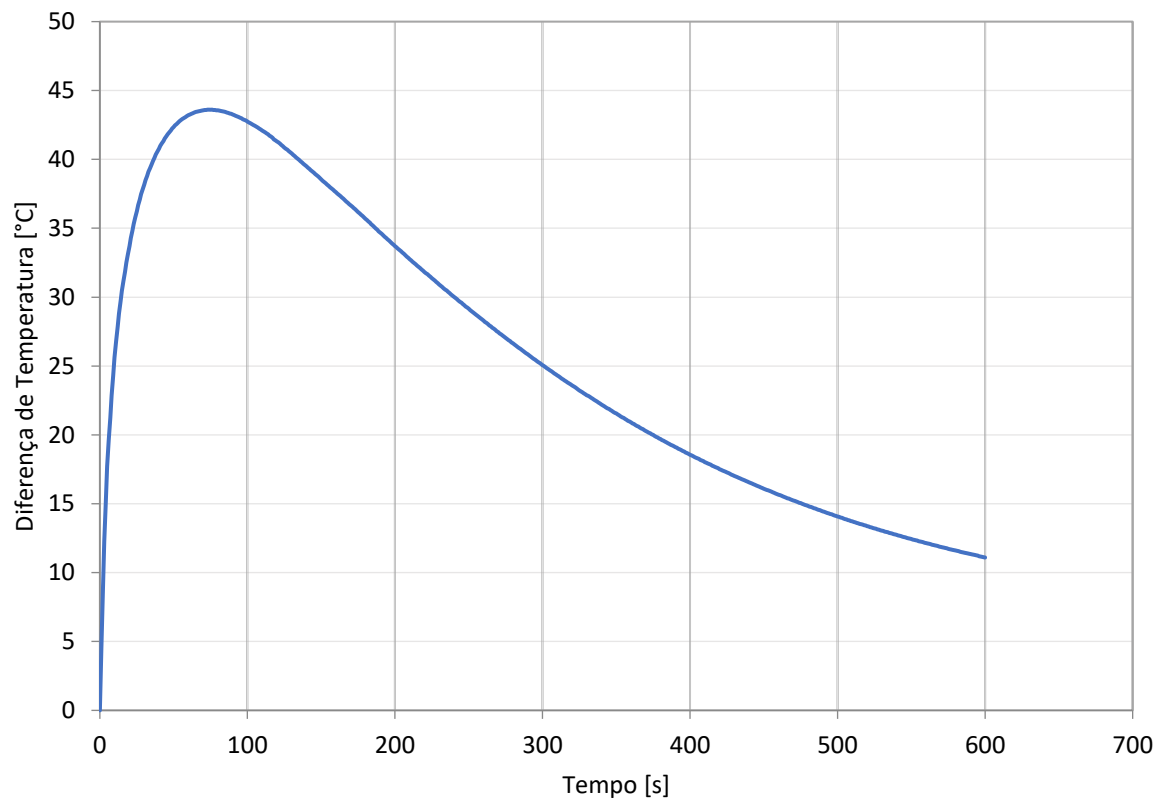


Figura 39 - Diferença de temperatura no molde em função do tempo – SolidWorks

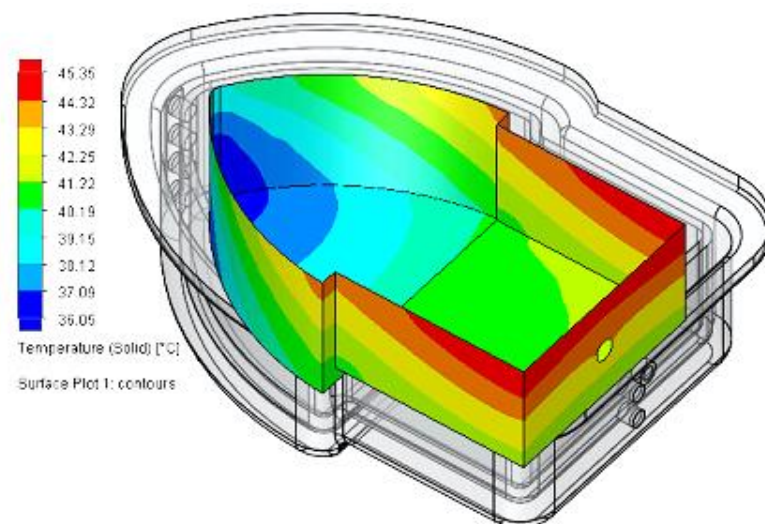


Figura 40 - Distribuição da temperatura no molde passados 7 minutos

## 6.3 Cálculo Analítico

### 6.3.1 Modelo e Formulação Analítica

De forma a poder validar os resultados obtidos pelo *SolidWorks Flow* foram realizados cálculos analíticos para obter um termo de comparação. Foram consideradas propriedades do ar e do alumínio constantes e independentes da temperatura. De forma a poder comparar os resultados analíticos com os numéricos não foi considerada a camada de polietileno de alta densidade (PEAD). O objetivo deste método analítico será perceber como a temperatura da superfície interior do molde irá variar com o tempo.

O aquecimento do molde pode ser representado de acordo com a Figura 41, onde estão representados os coeficientes de convecção do ar exterior,  $h_{ar(e)}$ , interior,  $h_{ar(i)}$  e os coeficientes de condução do alumínio e do polímero,  $k_{al}$  e  $k_{PEAD}$ .

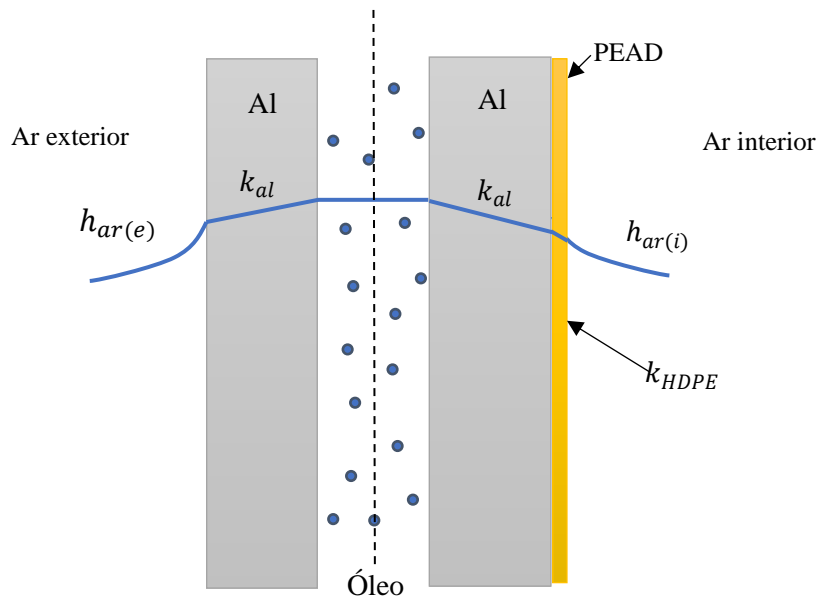


Figura 41 - Esquema simplificado do molde

Uma vez que se está a considerar constante a temperatura do óleo pode-se considerar uma parede adiabática no plano, indicado na Figura 41. Considere-se então o volume de controlo indicado na Figura 42.



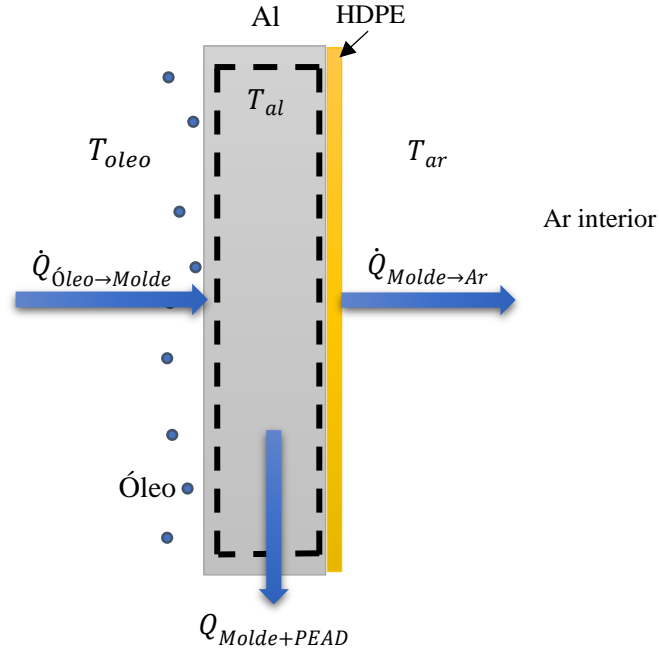


Figura 42 - Volume de controle considerado e balanço energético

Sabe-se que a taxa de transferência de calor por convecção é, segundo a lei do arrefecimento de Newton,

$$\dot{Q} = h A \Delta T \quad (20)$$

e por condução, segundo a lei de Fourier,

$$\dot{Q} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (21)$$

Sabe-se também que a energia necessária para aquecer um corpo de massa  $m$ , de  $\Delta T$  graus é dada por

$$\dot{Q} = m c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (22)$$

De forma a simplificar a resolução analítica, dada a alta condutividade do alumínio, foi considerado que a temperatura do mesmo é constante ao longo da espessura de parede.

Pode-se enunciar o balanço energético no volume de controle

$$Q_{in} = Q_{out} (=) \dot{Q}_{\text{Óleo} \rightarrow \text{Molde}} = \dot{Q}_{\text{Molde} \rightarrow \text{Ar}} + Q_{\text{Molde}} \quad (23)$$

$$(24)$$

$$h_{\text{óleo}} A (T_{\text{óleo}} - T_{\text{al}}^i) = h_{\text{ar}} A (T_{\text{al}}^i - T_{\text{ar}}) + (m_{\text{al}} * c_{p_{\text{al}}} (T_{\text{al}}^f - T_{\text{al}}^i))$$

Onde

$h_{\text{óleo}}$  = Coeficiente de convecção do óleo [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]

$h_{\text{ar}}$  = Coeficiente de convecção do ar [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]

$T_{\text{óleo}}$  = Temperatura do óleo, constante [ $^\circ C$ ]

$T_{\text{ar}}$  = Temperatura do ar interior do molde [ $^\circ C$ ]

$m_{\text{al}}$  = Massa da parede do molde [ $kg$ ]

$c_{p_{\text{al}}}$  = Calor específico do alumínio [ $kJ/kg \cdot K$ ]

$T_{\text{al}}^f$  = Temperatura final do alumínio [ $^\circ C$ ]

$T_{\text{al}}^i$  = Temperatura inicial do alumínio [ $^\circ C$ ]

$A$  = área da parede interna do molde em contacto com o óleo, [ $m^2$ ]

Todos estes fatores são conhecidos à exceção do coeficiente de convecção do ar, do óleo e da sua temperatura final, que é o valor que se quer calcular. Assim, resta calcular os coeficientes de convecção. Note-se que as parcelas correspondentes ao PEAD não estão a ser consideradas, pois também não o foram no método numérico.

### 6.3.2 Coeficiente de Convecção do Óleo e do Ar

#### 6.3.2.1 Coeficiente de Convecção do Óleo

De forma a simplificar o cálculo, e de acordo com a simplificação ilustrada na Figura 41, foi considerado o escoamento forçado de um fluido sobre uma placa plana. Para o efeito, foi calculado em primeiro lugar o número de Reynolds do escoamento, que representa a relação entre as forças de inércia e forças viscosas. Este número adimensional permite definir se o escoamento é laminar ou turbulento através do seu valor crítico.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (25)$$

A velocidade média do escoamento,  $U$ , foi calculada para um caudal total de 50 l/min (nos 4 moldes, 8 metades) ou seja 6,25 l/min (0,0001042 m<sup>3</sup>/s) por cada metade de molde

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{0,0001042}{0,00151} = 0,068985 \text{ m/s} \quad (26)$$

Sendo assim

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{0,068985 * 0,275}{1,4 * 10^{-6}} = 13550,54 < 5 * 10^5 = Re_c \quad (27)$$

Donde se conclui que o escoamento é laminar.

Para escoamento forçado laminar o número de Nusselt sobre uma placa plana é [10]

$$Nu = 0,664 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

Sendo

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{1,4 * 10^{-3} * 1,95 * 10^3}{0,1145} = 23,843 \quad (29)$$

Logo

$$Nu = 0,664 * 13550,54^{\frac{1}{2}} * 23,843^{\frac{1}{3}} = 222,47 \quad (30)$$

Resta agora calcular o coeficiente de convecção do óleo

$$Nu = \frac{h L}{k} \Rightarrow h = \frac{222,47 * 0,1145}{0,275} = 92,627 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

No ANEXO 8 pode ser encontrado o código para estes cálculos, que será útil mais tarde para obtenção dos gráficos da Figura 44, Figura 45 e Figura 46.

Este problema poderia também ter sido tratado como um escoamento no interior de um tubo, com o diâmetro hidráulico de 10mm, calculado na secção 4.2.

$$Re_{\phi h} = \frac{0,069 * 0,001}{1,4 * 10^{-6}} = 49,3 < 5 * 10^5 = Re_c \quad (32)$$

Para um escoamento laminar sobre um tubo circular isotérmico sabe-se que  $Nu=3.66$ , donde, para  $Pr$  calculado anteriormente obtém-se um coeficiente de convecção do óleo de  $101 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 6.3.2.2 Coeficiente de Convecção do Ar

Como foi atingida uma distribuição de temperaturas bastante uniforme poderá ser considerada, como simplificação, convecção natural sobre uma placa plana vertical isotérmica, podendo assim usar a expressão (33) para o cálculo do coeficiente de convecção [10].

$$\begin{cases} Nu = 0,59(GrPr)^{1/4} & , \quad 10^5 < GrPr < 10^9 \\ Nu = 0,1(GrPr)^{1/3} & , \quad 10^9 < GrPr < 10^{13} \end{cases} \quad (33)$$

$$Ra = Gr * Pr \quad (34)$$

onde Nu representa o número de Nusselt, a partir do qual se poderá, no final dos cálculos, obter o coeficiente de convecção.

É para isso necessário o número de Grashoff, que depende da aceleração gravítica, g, do coeficiente de expansão térmica do fluido,  $\beta$ , da diferença da temperatura de película e o ambiente, do comprimento da placa plana, L e da viscosidade cinemática do fluido (ar),  $\nu$ .

Para esta situação, onde as propriedades do fluido são avaliadas à temperatura de película [11] e [12].

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{200 + 25}{2} = 112,5^\circ C \quad (35)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_p - T_\infty) * L^3}{\nu^2} = \frac{9,81 * 2,605 * 10^{-3} * \left(\frac{200 + 25}{2} - 25\right) * 0,275^3}{24,14 * 10^{-6}^2} \quad (36)$$

$$= 84055767$$

$$Ra = Gr * Pr = 8,4 * 10^7 * 0,7 = 4,4 * 10^7 \quad (37)$$

Foi consultado o número de Prandtl para o ar à temperatura de película, sendo este 0,7 segundo a Figura 43.

Assim, através da expressão (33) e sabendo que  $Nu = \frac{hL}{k}$ , obtém-se um coeficiente de convecção natural de 6,4 W/m<sup>2</sup>K.

$$0,59(84055767 * 0,69)^{1/4} = \frac{h * 0,3}{0,03208} \rightarrow h = 6,4 \text{ w/m}^2 K \quad (38)$$

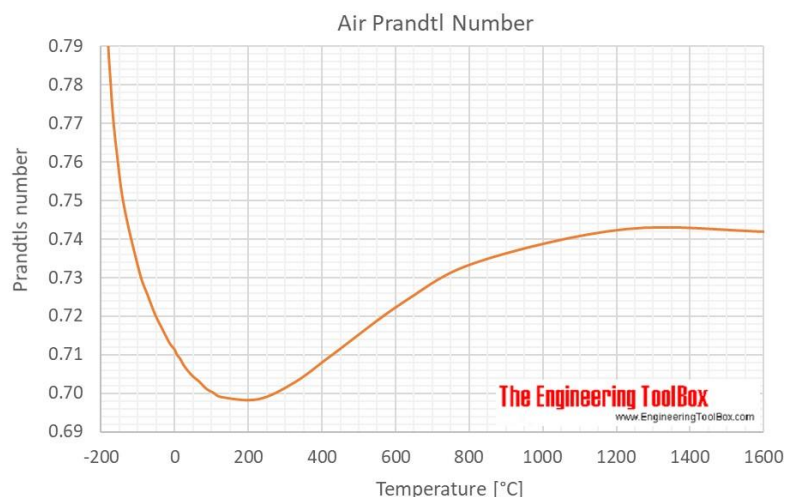


Figura 43 - Número de Prandtl do ar em função da temperatura <sup>9</sup>

## 6.4 Comparação de Resultados

Foi elaborado um programa em Octave por forma a calcular o aumento de temperatura no molde em intervalos curtos de tempo,  $\Delta t$ , obtendo o gráfico da Figura 44, onde se considera um caudal de 50l/min e intervalos de 0,1s. Este código pode-se encontrar no ANEXO 7.

Na Figura 44 pode ser observada a junção dos resultados analíticos com os resultados em *SolidWorks Flow* (Figura 31). Pode-se concluir que os resultados analíticos estão muito próximos dos numéricos, o qual comprova a fiabilidade dos mesmos. Assim, pode-se concluir que para um caudal de 50l/min o molde estará à temperatura desejada após cerca de 7 a 10 minutos.

Qualquer alteração de caudal irá influenciar o tempo de aquecimento, através do coeficiente de convecção do óleo. Assim, na Figura 45 pode-se observar a variação do coeficiente de convecção em função do caudal. Na Figura 46 percebe-se como é que o caudal afeta o tempo de aquecimento.

<sup>9</sup> [https://www.engineeringtoolbox.com/air-prandtl-number-viscosity-heat-capacity-thermal-conductivity-d\\_2009.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-prandtl-number-viscosity-heat-capacity-thermal-conductivity-d_2009.html) [acedido a 26/4/19]

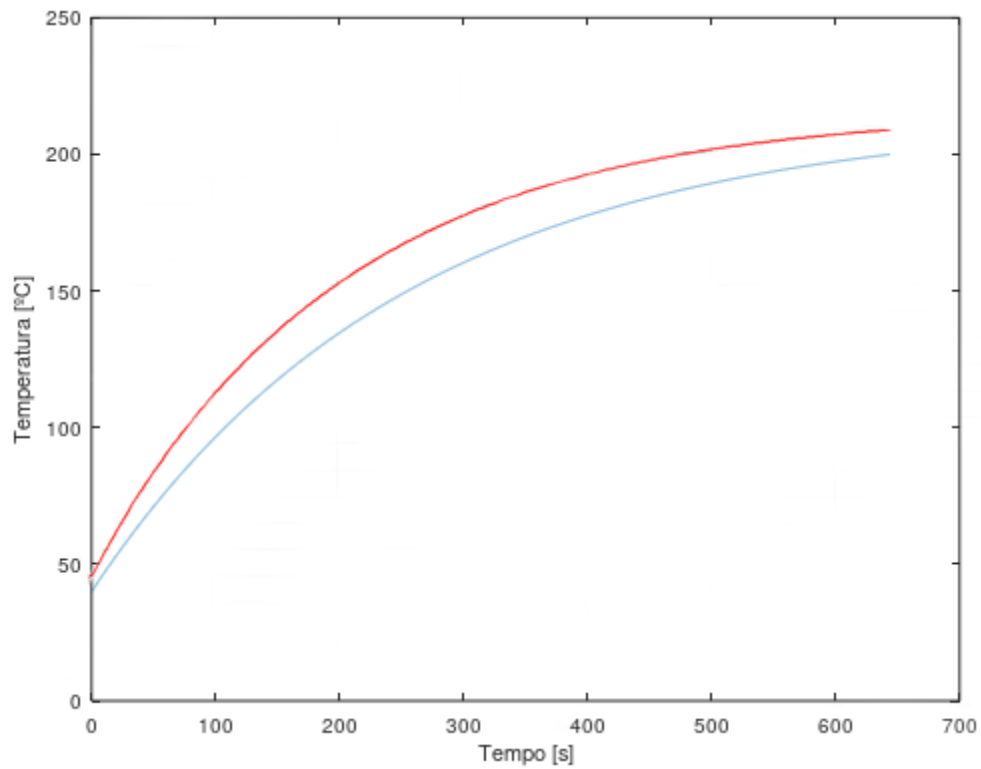


Figura 44 - Resultados analíticos (azul) e resultados numéricos (vermelho)

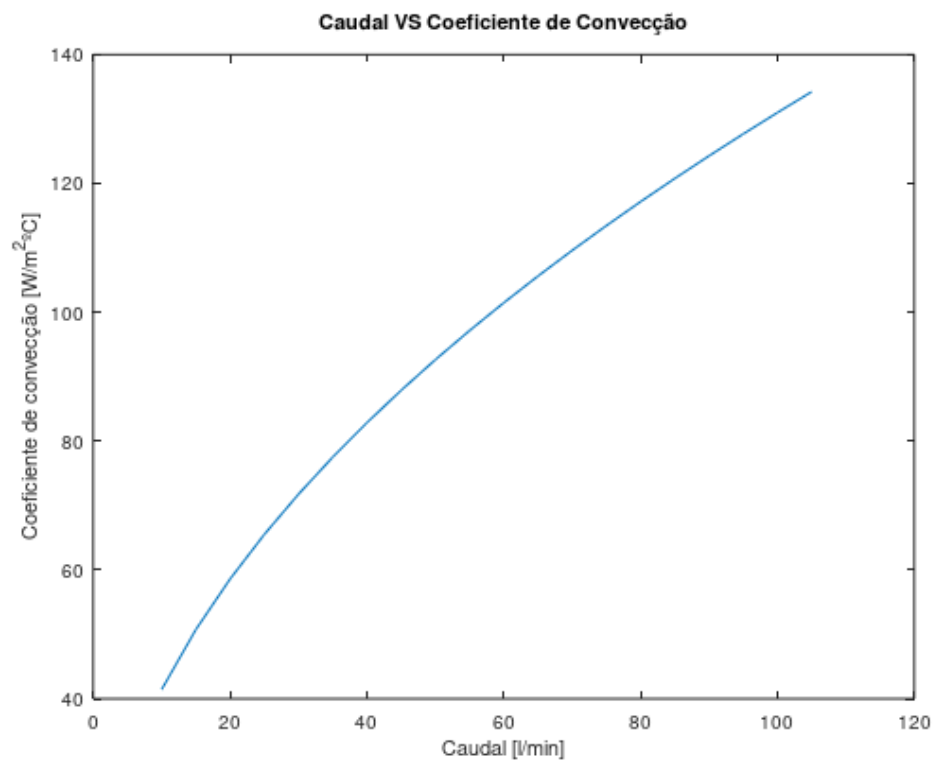


Figura 45 - Aumento do coeficiente de convecção do óleo com o aumento do caudal

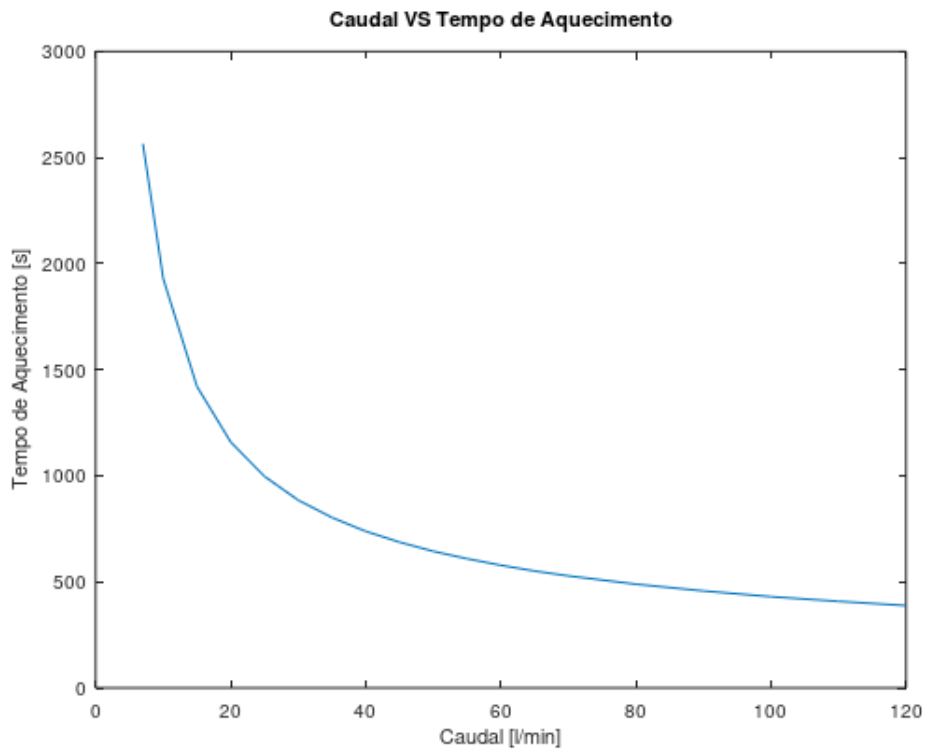


Figura 46 - Tempo de aquecimento do molde em função do caudal

Como se pode concluir das figuras anteriores, o caudal irá afetar bastante o coeficiente de convecção entre o óleo e o molde e consequentemente o tempo de aquecimento. Foi também concluído na Figura 27 que um aumento de caudal afetará negativamente a homogeneidade da distribuição espacial de temperatura.

Os tempos de aquecimento apresentados não incluem o tempo inicial de aquecimento do óleo. As simulações assumem que o óleo se encontra a 225°C inicialmente. Este tempo irá variar com a potência do equipamento de aquecimento. No caso do equipamento da Regloplas considerado nesta dissertação, com uma potência de 40kW, para aquecer um volume de 2 L, 2,06kg (ver ponto 7.6.2) vem:

$$\dot{Q} t = m * c_p * \Delta T \quad (39)$$

$$40 * t = 2,06 * 1,9 * (225 - 20) \rightarrow t = 20s \quad (40)$$

Como se pode ver, o tempo de aquecimento inicial do óleo, 20s, é desprezável quando comparado com o tempo total de aquecimento para um caudal de 6.l/min, 9min (540 s).





# 7. Estimativa do Consumo Energético

## 7.1 Parcelas de Consumo

Tendo em conta que uma das maiores preocupações desta dissertação é a redução dos custos energéticos da produção de peças por rotomoldagem será da maior importância a estimativa dos custos.

A energia necessária para o processo foi dividida em 4 parcelas, representadas na Figura 47.

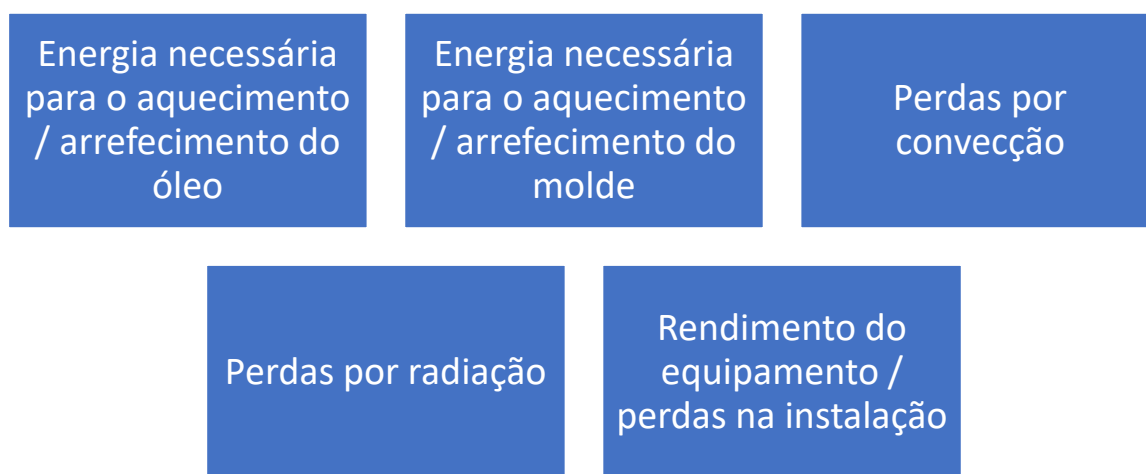


Figura 47 - Parcelas consideradas no cálculo do consumo energético

## 7.2 Energia de Aquecimento / Arrefecimento do Óleo

Foi definido anteriormente que o mais vantajoso em termos de tempos de ciclo e distribuição de temperatura seria utilizar óleo a 20°C, para arrefecer o molde e 225°C para o aquecer. Foi então calculada a energia que será necessário fornecer ao óleo para o levar de uma temperatura de 20°C a 225°C (e vice-versa). De acordo com a equação seguinte

$$Q = m c_p \Delta T \quad (41)$$

em que  $c_p$  representa o calor específico do fluido,  $m$  a sua massa e  $\Delta T$  a variação de temperatura que se lhe quer impor.

Uma vez que o calor específico varia linearmente com a temperatura poderá ser calculado o seu valor médio, na gama de temperaturas considerada, 1,9kJ/Kg.K, Figura 48. Consultando o catálogo do equipamento escolhido, Regloplas 300LD, sabe-se que esta tem um reservatório de 24 L, que corresponde a uma massa de óleo de 24,72 kg.

Da equação ( 41 ) resulta

$$Q = 24,72 * 1,9 * (225 - 20) = 9628,4 \text{ kJ}$$

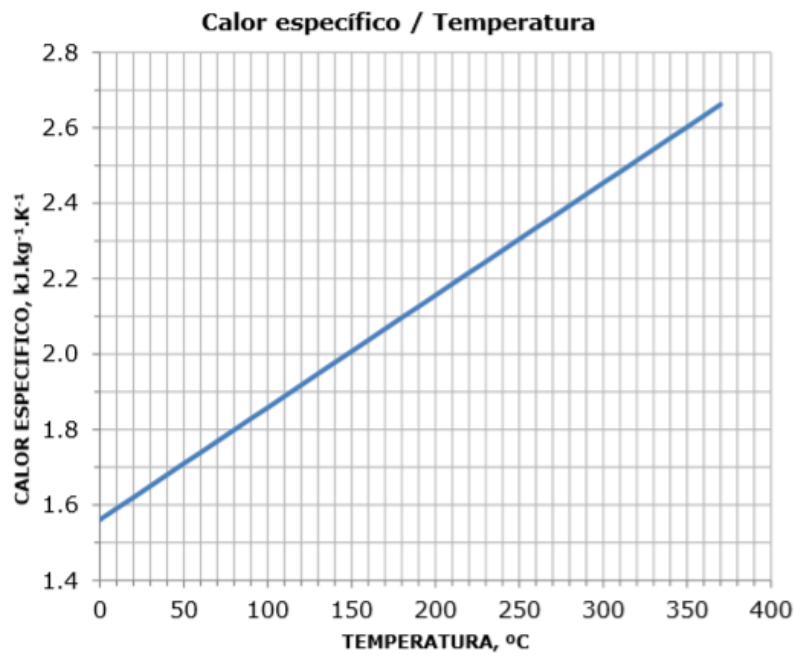


Figura 48 - Calor específico do óleo Galp Termoil SY em função da temperatura [ANEXO 2]

### 7.3 Energia de Aquecimento / Arrefecimento do Molde

Apesar de não ter sido encontrada a expressão exata para a variação do calor específico do alumínio em função da sua temperatura, esta assume a forma ilustrada na Figura 49.

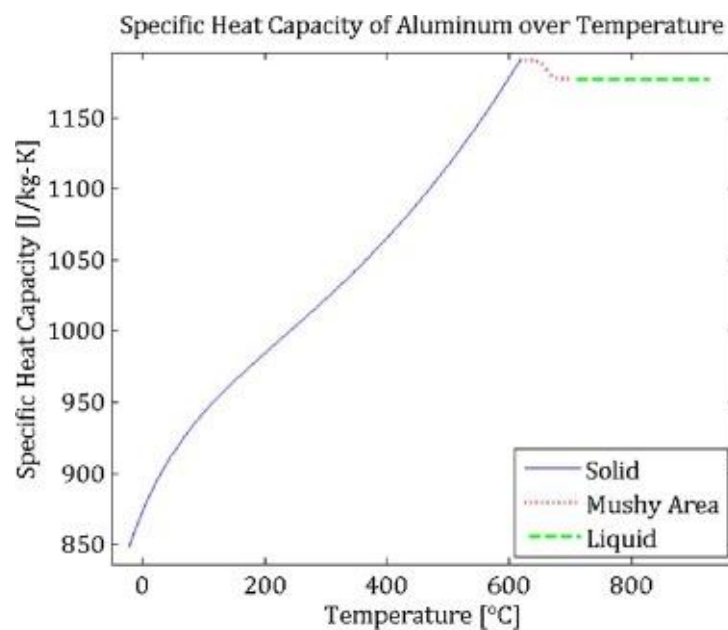


Figura 49 - Calor específico do alumínio em função da temperatura [13]

A curva pode ser aproximada a uma reta na gama de temperaturas em questão (40-200°C), podendo ser considerado o seguinte

$$Q = m (c_{p2}T_2 - c_{p1}T_1) = 50,9 (0,945 * 473,15 - 0,98 * 313,15) = 7138,2 \text{ kJ} \quad (42)$$

## 7.4 Perdas Energéticas por Convecção

O coeficiente de convecção do ar no molde, considerado uma placa plana, foi calculado no ponto 6.3.2.2. Sabendo este valor é possível o cálculo das perdas energéticas por convecção.

$$\dot{Q} = h A \Delta T = 6,4 * (4 * 0,27) * (200 - 25) = 1220,8 \text{ W} \quad (43)$$

Sabe-se que a área de superfície do molde em contacto com o ar é de  $0,27 \text{ m}^2$  por peça. Sabendo que um molde produz 4 peças vem  $Q = 1220,8 \text{ W}$  que, para um tempo de aquecimento de 9 min (obtido no capítulo 6) resulta numa energia de cerca de 659,232 kJ. Este valor será também considerado para o arrefecimento, por simplificação, apesar de ser ligeiramente inferior.

## 7.5 Perdas Energéticas por Radiação

Como foi abordado na secção 4.2, através da Figura 20, poderá ser considerada uma rugosidade superficial do molde de até  $0,8 \mu\text{m}$ , que corresponde a uma superfície polida. A emissividade do alumínio é menor quanto menor for a sua rugosidade superficial. Esta aumenta com o aumento da temperatura do material. No caso em estudo pode-se considerar a temperatura máxima, pois será uma aproximação para o lado da segurança. Assim, para alumínio polido a uma temperatura de cerca de 200°C a emissividade a considerar será de 0,05 (Tabela 13).

Tabela 13 - Emissividades do alumínio para diferentes temperaturas e acabamentos [14]

Aluminum	310 K	530 K	800 K
Polished	0.04	0.05	0.08
Oxidized	0.11	0.12	0.18
24-ST weathered	0.40	0.32	0.27
Anodized (at 1000°F)	0.94	0.42	0.60

Através da equação

$$E = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4) = 0,05 * 5,67 * 10^{-8} (200^4 - 25^4) = 119,7 \text{ W/m}^2 \quad (44)$$

Onde E representa a potência total irradiada e  $\sigma$  a constante de Stephan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ).

Obtém-se, assim,  $E = 119,7 \text{ W/m}^2$ . Para a mesma área considerada anteriormente,  $1,09 \text{ m}^2$ , conclui-se que, para um período de 9 min as perdas energéticas são de cerca de 70,455 kJ. Uma vez mais será este o valor considerado para o arrefecimento.

## 7.6 Custo Energético por Peça

### 7.6.1 Primeira Abordagem – Um Único Circuito de Óleo

Os resultados adquiridos anteriormente, assim como o valor total de energia consumida e a percentagem de cada ‘componente’ encontram-se agrupados na Tabela 14.

*Tabela 14 – Energia a fornecer ao molde para o aquecimento*

Local	Energia [kJ]	%
Óleo	9628	55
Molde	7138	40
Convecção	660	4,6
Radiação	70	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>17496</b>	

De notar que estes valores refletem a energia a fornecer ao molde e não a energia total do processo. De forma a obter a energia total do processo basta considerar o rendimento da máquina, desprezando perdas de convecção e radiação nas tubagens.

Foram também obtidos os valores de energia a retirar ao sistema para o arrefecimento, os quais estão expressos na Tabela 15.

*Tabela 15 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento*

Local	Energia [kJ]
Óleo	9628
Molde	7138
Convecção	660
Radiação	70
<b>TOTAL</b>	<b>16036</b>

É importante salientar que esta é apenas a energia que será necessário retirar ao sistema para o processo de arrefecimento e não a energia final que será consumida no processo. Para obter esse valor seria necessário conhecer o rendimento da máquina, a energia que é necessário fornecer à mesma para retirar 16036 kJ ao sistema.

Analisando ambos casos, é obvio que o aquecimento e o arrefecimento da massa de óleo representam uma percentagem elevada do consumo total (55% e 60% para o aquecimento e o arrefecimento, respetivamente). Estes valores, particularmente do arrefecimento, são bastante elevados, uma vez que o objetivo final é o aquecimento do molde, logo deveria ser esta a parcela maior.

Este é um problema que muito facilmente se resolve, evitando a necessidade de aquecer e arrefecer toda a massa de óleo a cada ciclo. Para isto bastará considerar o caso em que, em vez de utilizar um dos equipamentos selecionados (Regloplas 300LD) serão utilizados dois, um para aquecer e outro para arrefecer o óleo. Outra alternativa poderá passar pela adaptação do equipamento às necessidades, acrescentando um segundo reservatório e passando a ter dois circuitos de óleo.

### 7.6.2 Segunda Abordagem – Dois Circuitos de Óleo

Tendo como base as conclusões anteriores, foi calculada a energia necessária para aquecer e arrefecer o molde considerando circuitos independentes do óleo, de frio e de quente.

Nesta situação, o volume de óleo a considerar será apenas aquele que se encontra no molde, mais algum que se possa ainda encontrar em tubagens no momento de transição de fases (aquecimento/arrefecimento), 2L, que equivale a 2,06 kg. De acordo com a equação ( 41 ) vem

$$Q = 2,06 * 1,9 * (225 - 20) = 802,37 \text{ kJ} \quad ( 45 )$$

Assim, sendo que as restantes parcelas se mantêm, vem a Tabela 16.

*Tabela 16 - Energia a fornecer ao molde para o aquecimento*

Local	Energia [kJ]	%
Óleo	802	9
Molde	7138	82
Convecção	660	8
Radiação	70	1
<b>TOTAL</b>	<b>8670</b>	

No caso do arrefecimento, representado na Tabela 17 fica

*Tabela 17 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento*

<b>Local</b>	<b>Energia [kJ]</b>
<b>Óleo</b>	802
<b>Molde</b>	7138
<b>Convecção</b>	660
<b>Radiação</b>	70
<b>TOTAL</b>	7210

Comparando a Tabela 14 e a Tabela 16 conclui-se que esta solução permite diminuir a energia necessária em cerca de metade, sendo o resultado muito positivo.

Fará todo o sentido uma análise ao custo de aquisição de dois equipamentos ou adaptação do mesmo à solução definida de modo a perceber se o custo acrescido compensa a poupança em termos energéticos.

Dos cálculos acima, assumindo que os rendimentos de aquecimento e arrefecimento do equipamento de controlo de temperatura são iguais se conclui que a inclusão de uma camada isoladora não trará benefício ao sistema. Ora:

$$E_{tot} = E_{aquecimento} + E_{arrefecimento}$$

$$E_{tot} = [E_{\text{óleo}} + E_{\text{molde}} + E_{\text{convecção}} + E_{\text{radiação}}] + [E_{\text{óleo}} + E_{\text{molde}} - E_{\text{convecção}} - E_{\text{radiação}}]$$

O benefício da camada isoladora prende-se com a diminuição das perdas por convecção e radiação durante o aquecimento. No entanto esse mesmo efeito será prejudicial durante o arrefecimento, onde a mesma quantidade de energia irá ficar retida no sistema, tendo de ser retirada pelo óleo.

## 8. Redução de Custos

### 8.1.1 Poupança Energética

Por forma a poder estabelecer uma comparação entre o método estudado e o atual (rotomoldagem em forno) foi pedida à empresa informação relativamente ao consumo atual.

Não foi possível averiguar o consumo energético por peça, pois a empresa não realiza um controlo tão detalhado do mesmo. Assim, por ser o único dado acessível, será utilizado para comparação o consumo médio por quilo de matéria prima no processo de rotomoldagem. Este valor foi disponibilizado pela empresa e considera várias peças de geometrias e tempos de ciclo variados.

Não obstante, como termo de comparação é um valor suficientemente bom. Este pequeno pormenor exemplifica de forma bastante real as diferenças entre trabalhos académico e empresarial, onde neste é necessário realizar várias aproximações e suposições. Como tal os valores calculados de seguida deverão ser tidos como valores médios, apenas indicativos.

De acordo com a informação fornecida pela empresa o processo de rotomoldagem em forno tem, atualmente, um consumo médio de 13,1kWh por kg de matéria prima processada. Assim, sendo que cada peça tem 0,65kg, o consumo total por cada 4 peças (1 molde) será de

$$13,1 * 0,65 * 4 = 34,06 \text{ kWh} \quad (46)$$

Da Tabela 16 e Tabela 17 obtém-se um consumo energético total por cada 4 peças (1 molde) de 15880 kJ. É importante salientar que este valor não considera perdas fora do molde, nem o rendimento do equipamento utilizado. Assim, considerando fator de correção de 50% para os dois fatores mencionados vem um consumo total de 31762kJ, ou 8,82 kWh por cada molde (4 peças).

Finalmente pode ser calculada a redução do consumo, em percentagem

$$\frac{34,06 - 8,82}{34,06} * 100 = 74,1\% \quad (47)$$

A redução calculada vai ao encontro de previsões encontradas em bibliografia [14], [2].

Por outro lado, é necessário ter em atenção que o consumo atual, 34,06kWh se encontra dividido entre consumo elétrico e de gás. Estima-se que para este tipo de equipamento (forno) a relação entre os consumos de gás e de eletricidade seja de 90/10 [15].

Uma vez que a solução aqui proposta apenas implica consumo de eletricidade, será necessário apurar o custo de cada caso por forma a poder realizar uma comparação.

Consultando as faturas de luz e gás da empresa foi apurado um consumo por kWh, para cada caso, de acordo com a Tabela 18.

*Tabela 18 - Custo por kWh da eletricidade VS gás*

	<b>Custo</b>
<b>Eletricidade</b>	0,09153 €/kWh
<b>Gás</b>	0,034895 €/kWh

Finalmente, pode-se concluir, por observação da Tabela 19, que o método de aquecimento proposto nesta dissertação implica uma poupança de 15 cêntimos por peça, cerca de 43% face ao método tradicional. Segundo as informações fornecidas pela empresa, o custo médio de produção da empresa ronda os 2€/kg. Assim, esta poupança energética, 0,23€/kg, representará uma redução de 11,5% no custo final de produção.

Resta agora perceber se esta poupança justifica o investimento numa nova tecnologia. Este estudo será feito no capítulo seguinte.

*Tabela 19 - Custo total por peça [€] produzida no forno VS no molde em estudo*

	<b>Custo Unitário</b>		<b>Unidades [kWh]</b>	<b>Custo total</b>	<b>Custo por Peça</b>
<b>Forno</b>	Gás	0,034895	30,654	1,4	0,35
	Eletricidade	0,009153	3,406		
<b>Molde</b>					
<b>Aquecimento Integrado</b>	Eletricidade	0,09153	8,82	0,80	0,20

### 8.1.2 Poupança Relativa à Mão-de-Obra

Tal como foi mostrado ao longo desta dissertação, este método de aquecimento permite uma redução significativa do tempo de ciclo. Uma redução no tempo de ciclo trará várias vantagens à empresa, para além da vantagem óbvia da redução do custo de mão-de-obra por kg produzido. Duas das grandes vantagens serão o aumento da capacidade de produção e do tempo de resposta, que tornarão a oferta da empresa mais vantajosa para um possível cliente.

Consultando a ficha de produto da peça em questão foi possível determinar que o seu tempo de produção atual é de 42 minutos (21 minutos de aquecimento, 16 de arrefecimento e 5 de manuseamento). No capítulo 6 foram determinados os tempos de aquecimento e de arrefecimento, que variam com o caudal escolhido. Considere-se um tempo de aquecimento de 9 minutos, correspondente



a um caudal de 60 l/min, e um tempo de arrefecimento de 7 minutos, obtendo um total de 16 minutos. No caso em estudo não há necessidade de manusear o molde entre as fases de aquecimento e arrefecimento, logo o tempo de manuseamento será evidentemente menor. Assim, pode-se assumir um tempo de ciclo de 20 minutos, conservadoramente. Isto representará uma redução do tempo de ciclo de 52,4%, o qual implicará uma grande poupança económica, sob o ponto de vista de acréscimo de tempo disponível.

$$\frac{42 - 20}{42} * 100 = 52,4\% \quad (48)$$

No entanto, é importante salientar que esta redução de cerca de 50% no tempo de ciclo foi calculada para esta peça em particular e dependerá sempre de condições como o caudal e temperatura do óleo. É também necessário relembrar que não foi possível obter informações relativamente à redução máxima do tempo de ciclo, que se prende com a capacidade do polímero de ser aquecido ou arrefecido muito rapidamente.

Apesar de não poder ser generalizada para todas as peças representa ainda assim um bom ponto de partida. De seguida, será feito um estudo ‘rápido’ da aplicabilidade deste método de aquecimento a outra peça da gama de produção da empresa, cuja redução de tempo de ciclo poderá ser confrontada com os valores aqui obtidos.



# 9. Aplicabilidade do Método a Outras Geometrias

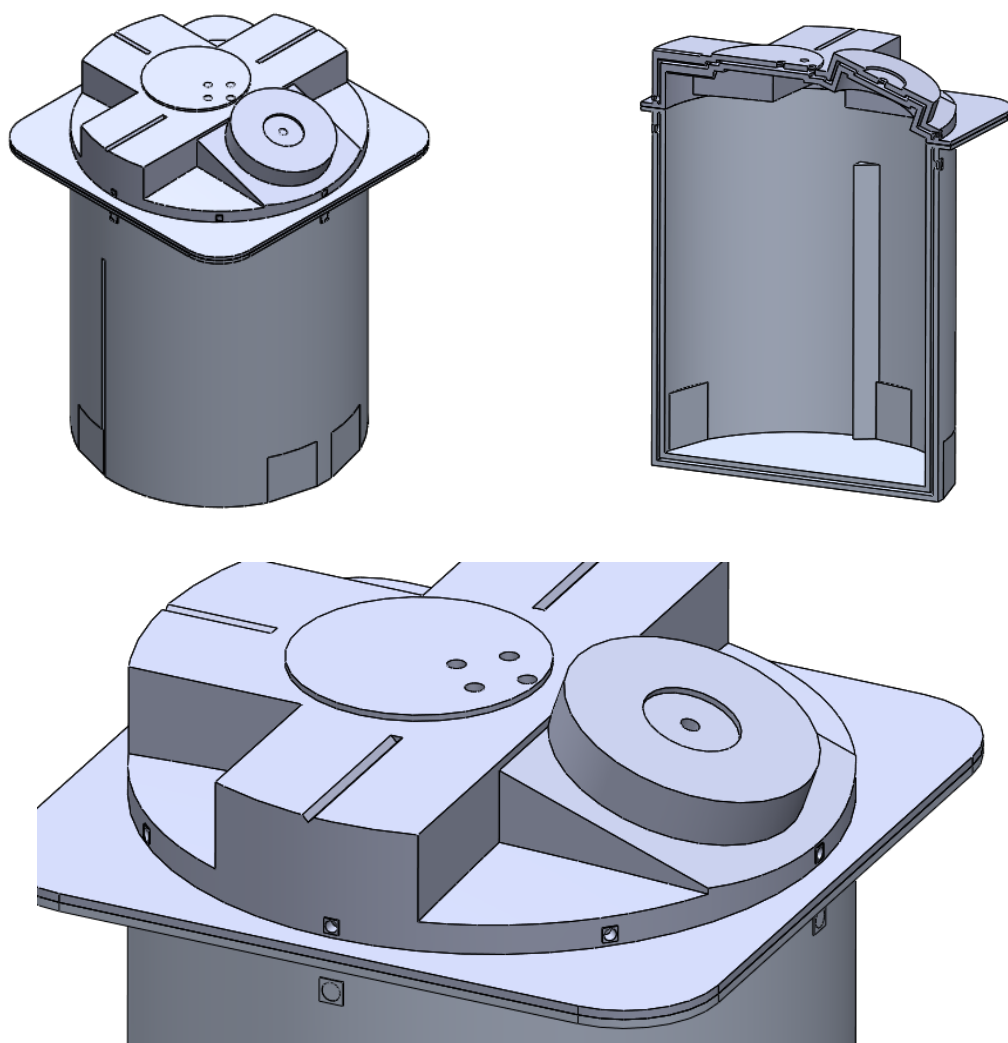
Tal como mencionado anteriormente o grande objetivo desta dissertação é a contribuição para uma metodologia de projeto de moldes com aquecimento integrado para obtenção de peças por rotomoldagem. Posto isto foi escolhida uma segunda peça produzida pela empresa, de modo a estudar a aplicabilidade deste método a outras geometrias e tentar generalizar os resultados obtidos em termos de poupança energética e de tempo de ciclo.

Na escolha desta peça foram considerados os seguintes critérios

- Produção anual
- Tamanho da peça
- Geometria

Foi escolhido um doseador de 100L, por ter uma produção anual considerável, 1000 peças/ano, por ser muito maior relativamente à primeira peça estudada e pela sua geometria relativamente complexa.

Foi assim elaborado em SolidWorks um modelo do molde, da mesma forma que foi feito com a primeira peça, paredes de 10mm com uma distância entre si de 5mm. Estas paredes seguem a geometria da peça, com algumas simplificações na camada exterior, que permitem uma redução considerável do custo de produção do molde, por diminuir o tempo de maquinagem. Foram também realizadas várias simulações para diferentes posições dos furos, de modo a conseguir uma distribuição uniforme do fluido. A geometria do molde encontra-se na Figura 50.



*Figura 50 - Molde com aquecimento integrado para produção do Doseador 100L*

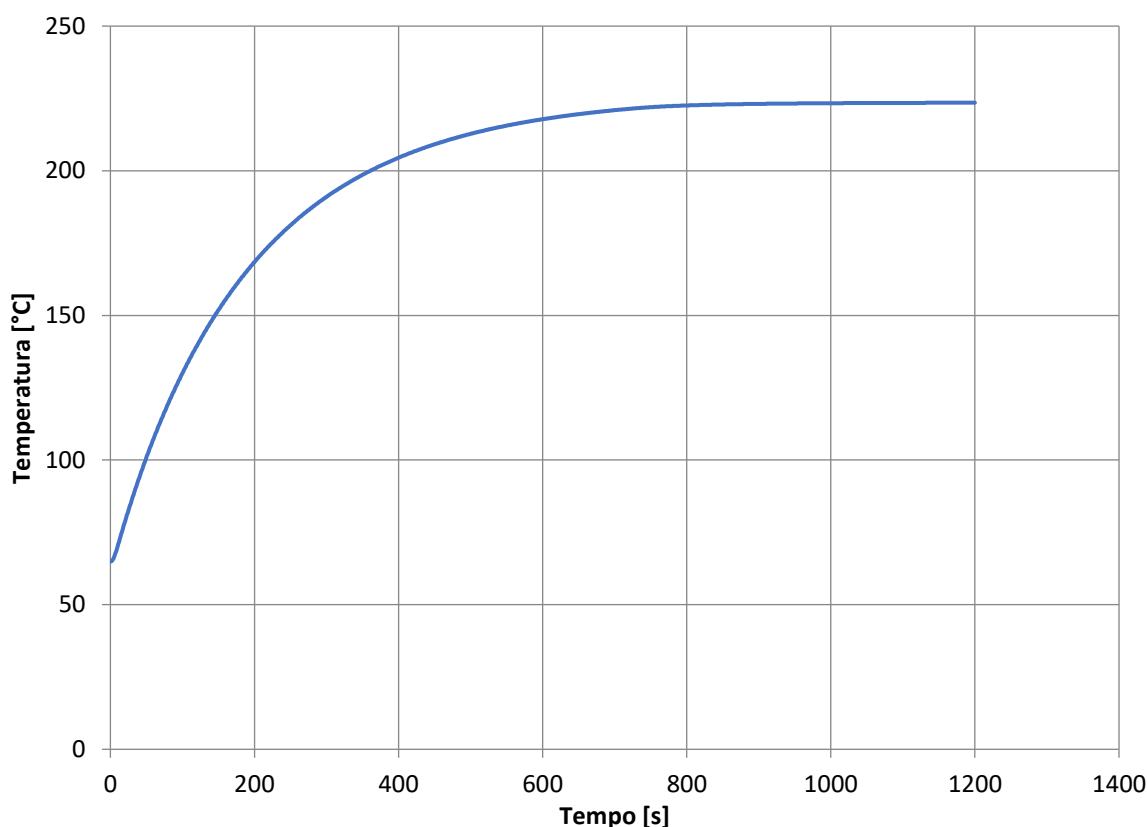
De seguida foram estudadas algumas das mesmas questões consideradas para a primeira peça

- Tempo de aquecimento
- Uniformidade de temperatura no molde
- Custo energético

## 9.1 Tempo de Aquecimento

Na Figura 51 e na Figura 52 pode-se observar a temperatura média, a diferença máxima e temperaturas na face interior do molde, em contacto com o polímero. Pode-se concluir que o tempo de aquecimento será de 460 segundos, menos de 8 minutos, quando o molde atinge os 200°C.

Na Figura 52 pode-se ver que a variação máxima de temperatura é de cerca de 90°C, um valor ainda elevado para produção de peças por rotomoldagem. No entanto, como foi mostrado na secção 6.2 (ver Figura 34), essa diferença pode ser atenuada alterando o caudal, por exemplo. Foi também mencionado que os valores da Figura 52 traduzem uma aproximação à realidade, por excesso.



*Figura 51 - Temperatura média do molde em função do tempo*

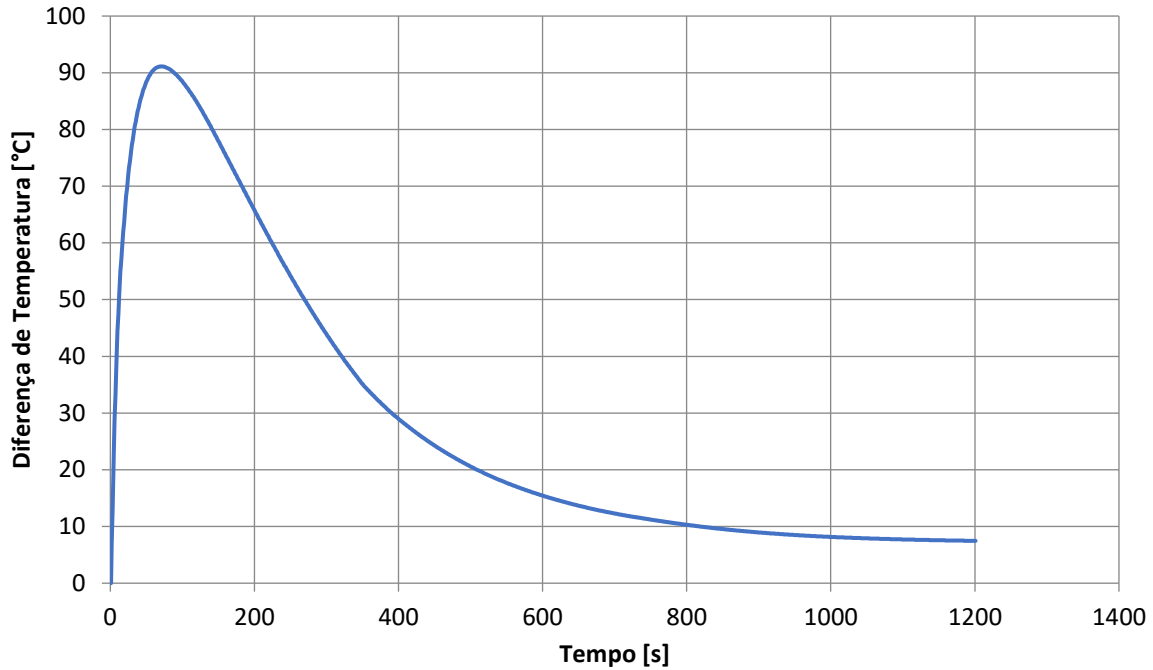


Figura 52 - Diferença máxima de temperatura na superfície do molde em contacto com o polímero

## 9.2 Custo Energético

### 9.2.1 Aquecimento / Arrefecimento da Massa de Óleo

Da mesma forma que no primeiro caso, a massa total apenas terá de ser aquecida uma vez, pelo qual considera-se apenas a energia necessária para aquecer o óleo dentro do molde.

De acordo com a equação ( 41 ),

$$Q = m * c_p * \Delta T = 8,358 * 1,03 * 1,9 * (225 - 20) = 3353,1 \text{ kJ} \quad ( 49 )$$

### 9.2.2 Aquecimento / Arrefecimento do Molde

Novamente, tal como calculado na secção 7.3, desta vez para um molde de 96.3kg

$$Q = m (c_{p2}T_2 - c_{p1}T_1) = 96,3 (0,945 * 473,15 - 0,98 * 313,15) = 13505,1 \text{ kJ} \quad ( 50 )$$

### 9.2.3 Perdas por Convecção

Referenciando o capítulo 6, o coeficiente de convecção natural pode ser calculado para uma placa plana com 0,75m de altura pelas mesmas equações, obtendo um coeficiente de 6,7 W/m<sup>2</sup>°C, com auxílio do ANEXO 9.

Assim,

$$\dot{Q} = h A \Delta T = 6,7 * 2,02 * (200 - 25) = 2363 \text{ W} \quad (51)$$

que num período de 540s representa uma energia de 1276 kJ, sendo que o molde em questão tem uma área superficial de 2,02 m<sup>2</sup>.

### 9.2.4 Perdas por Radiação

Tal como foi calculado na secção 7.5

$$E = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4) = 0,05 * 5,67 * 10^{-8} (200^4 - 25^4) = 119,7 \text{ W/m}^2 \quad (52)$$

Neste caso, para uma área superficial de 2,02 m<sup>2</sup>, a energia perdida por radiação será de 120,6 kJ, num intervalo de 500s.

*Tabela 20 - Energia a fornecer ao sistema para o aquecimento*

Local	Energia [kJ]	%
Óleo	3353	18
Molde	13505	74
Convecção	1276	7,4
Radiação	120	0,6
<b>TOTAL</b>	<b>18254</b>	

*Tabela 21 - Energia a retirar ao sistema para o arrefecimento*

Local	Energia [kJ]
Óleo	3353
Molde	13505
Convecção	1276
Radiação	120
<b>TOTAL</b>	<b>15462</b>

De forma similar ao que foi feito anteriormente fará sentido considerar um fator de correção de 50%, uma vez que os cálculos anteriores apenas consideram as trocas energéticas dentro do molde. Finalmente a energia necessária para produção de um doseador de 100L será de 67432 kJ, ou 18,73 kWh.

$$\frac{18106 + 15610}{0,5} = 67432 \text{ kJ} \quad (53)$$

Foi elaborada uma tabela similar à Tabela 19, com o custo de produção por peça para o doseador de 100L, na Tabela 22, assumindo uma vez mais um consumo médio de 11,8kW/kg para produção em forno e uma relação de 90/10 relativamente ao consumo de gás e eletricidade.

*Tabela 22 - Custo de produção por peça*

	<b>Custo Unitário</b>		<b>Unidades [kWh]</b>	<b>Custo por Peça</b>
<b>Forno</b>	Gás	0,034895	70,8	3,19
	Eletricidade	0,0093	7,867	
<b>Molde Aquecimento Integrado</b>	Eletricidade	0,093	18,731	1,71

Conclui-se então que há uma poupança de 1,48€ por peça, o qual represente uma diminuição de 47% nos custos energéticos, e de 12,3% relativamente ao custo total da peça (2€/kg, em média).

Finalmente, podem-se comparar os resultados da primeira peça com esta segunda, de forma a perceber qual poderá ser a poupança em termos de tempo de ciclo e custos energéticos.

Em termos de custos energéticos da primeira peça conclui-se que a poupança será de 11,5% relativamente ao custo de produção indicado pela empresa de 2€/kg. Na segunda peça a poupança estimada é de 12,3%, o qual leva a crer que a poupança média estimada seja de cerca de 12%. Este valor é muito similar ao publicitado pela Persico, a única empresa a produzir equipamentos de rotomoldagem com aquecimento a óleo.

Relativamente ao tempo de ciclo na primeira peça estudada viu-se uma redução de cerca de 50%. Esta segunda peça em estudo tem um tempo de ciclo atual de 19+18+5=42 minutos. O método proposto implica um tempo de aquecimento de cerca de 8 minutos. Por analogia com o primeiro caso, admitindo um tempo de arrefecimento é, no limite, igual e considerando que o tempo de manuseamento se mantém, a redução do tempo de ciclo será de cerca de 50% e, portanto, análoga ao calculado no primeiro caso.



Por fim, analisando os dados de ambas as peças, pode-se concluir que o método se aplica tanto a peças de pequenas como grandes dimensões e é apto para peças com geometria relativamente complexa, como é o caso desta segunda peça. Sabe-se que os custos energéticos e de mão de obra de uma peça em rotomoldagem representam, tipicamente 20% e 15% do custo total de produção [15]. Assim, restará concluir que a poupança total prevista será de 10%. Uma vez mais, este valor vai ao encontro do disponibilizado para equipamentos com o mesmo método de aquecimento.

*Tabela 23 - Distribuição de custos em rotomoldagem [15]*

<b>Categoria</b>	<b>Custo</b>
Matéria Prima	65%
Gás	17,5%
Eletricidade	2,5%
Mão de Obra	15%



# 10. Estudo dos Custos da Solução

## 10.1 Fatores que Exigem Investimento

Tal como mencionado no capítulo anterior será necessário estimar os custos inerentes à introdução de um novo método de rotomoldagem, para poder apreciar face aos seus benefícios.

Para o tipo de solução proposta estimam-se três fatores que exigem investimento:

- Fabrico de novos moldes, uma vez que os moldes atualmente utilizados pela empresa não se adaptam ao processo.
- Aquisição de equipamento para aquecer e arrefecer o óleo.
- Aquisição / fabrico de equipamento que confira o movimento de rotação ao molde – braço rotativo.

Por limitações de tempo não foi possível obter orçamentos relativamente a certos custos (custo de produção do molde, por exemplo). Estes foram estimados de forma empírica, com o *input* de engenheiros da empresa, muito habituados a lidar com estes temas.

## 10.2 Custos de Fabrico do Molde

Foi feito um estudo da geometria proposta para o molde, no capítulo 3, após o qual, numa discussão com os engenheiros da empresa foi estimado um orçamento para o mesmo.

O molde existente para produção destas peças teve um custo de 4800€. Foi estimado que um molde de acordo com o proposto nesta dissertação tenha um custo cerca de 3 vezes superior. Assim, prevê-se que o custo do molde ronde os 15000€.

## 10.3 Custos de Aquisição de Equipamento

Outro custo que se prevê que seja uma boa percentagem do total é a aquisição do equipamento de aquecimento e de arrefecimento do óleo. Este equipamento foi selecionado de entre vários na secção 2.2 e foi então pedido um orçamento à empresa que o comercializa em Portugal, a Regloplas. O orçamento do equipamento em questão ronda os 20000€.

## 10.4 Custos do Braço Rotativo

Apesar de não ter sido possível a obtenção de um orçamento para um braço rotativo adaptado para este tipo de tecnologia, foi disponibilizado o orçamento dos braços que atualmente a empresa utiliza para produção de peças por rotomoldagem numa máquina de carrossel. Estes braços têm um custo de cerca de 20000€.

## 10.5 Análise Custo VS Benefício

Tendo em conta os investimentos mencionados acima foi possível elaborar Tabela 24, onde consta o investimento total necessário para produzir peças do tipo punta finger pelo método estudado nesta dissertação.

*Tabela 24 - Investimento inicial requerido para realização de testes*

<b>Equipamento</b>	<b>Investimento</b>
Regloplas 300LD	20 000 €
Molde	15 000 €
Braço Rotativo	20 000€
<b>TOTAL</b>	<b>55 000 €</b>

Foi calculado no capítulo 8 que a poupança que advém deste método será cerca de 10% do custo atual. Assim, sabendo que o custo atual está estimado em 2€/kg, a poupança será de 20 centimos por kg.

Uma vez que a empresa produz milhares de peças de centenas de moldes diferentes poderá ser assumido que o custo por kg dos equipamentos de controlo de temperatura e do braço rotativo são marginais. Assim o custo acrescido de aquisição dos moldes propostos face aos moldes tradicionais será de 10200€ para este molde em particular. Dada a poupança estimada de 0.2€/kg, calcula-se que para atingir o *break-even point* seria necessário produzir 51 000kg destas peças. Atendendo a que cada peça tem uma massa de 0.65kg (2.6kg por molde) isto implica a produção de cerca 20 000 ciclos, o qual vai de encontro aos níveis de produção da empresa.

# 11. Proposta Para Metodologia de Projeto

Com a realização desta dissertação foram definidos passos a seguir no projeto de moldes de rotomoldagem com aquecimento através de um fluido térmico. Algumas das decisões tomadas no projeto do molde aqui considerado são específicas para este projeto e não poderão ser generalizadas para outros moldes.

No entanto, a metodologia seguida e proposta nesta dissertação será a mesma para projetos futuros e encontra-se representada pelo fluxograma da Figura 53. É de referir que esta proposta de metodologia constitui uma primeira abordagem, com base no que foi realizado, portanto, não contempla aspetos que não foram considerados, mas que podem ser integrados num trabalho futuro.

Será sempre necessária a realização das simulações a que se procedeu nesta dissertação. No entanto, o trabalho de confirmação de resultados analiticamente já foi realizado, podendo ser usado como ponto de partida para trabalhos futuros.

É aconselhável a utilização de um óleo com uma pressão de cavitação baixa, de modo a evitar necessidade de pressões elevadas dentro do molde. Desta forma a espessura das paredes poderá ser reduzida, diminuindo o consumo energético e aumentando a flexibilidade no controlo do tempo de ciclo. Deverá sempre ser feito um estudo estático das deformações no molde devido à pressão aplicada pelo óleo no mesmo.

De seguida, após definida a espessura de parede necessária deverá ser realizado um estudo completo da distribuição do fluido no molde, por forma a definir a secção de passagem do óleo. Neste caso foi concluído que uma parede de 5mm seria suficiente para assegurar uma distribuição uniforme do fluido. Apesar de se prever que este valor possa vir a ser transversal a outros moldes será sempre necessária uma simulação para confirmar.

Após isto, com a geometria do molde definida deverá ser considerada a componente térmica do projeto. Deverá ser determinada uma temperatura e um caudal de óleo por forma a conseguir um aquecimento uniforme e dentro do tempo desejado.

Assim sendo e de forma resumida haverá três grandes preocupações / áreas de estudo para projeto dos moldes

- Estrutural
- Térmica
- Escolha do equipamento

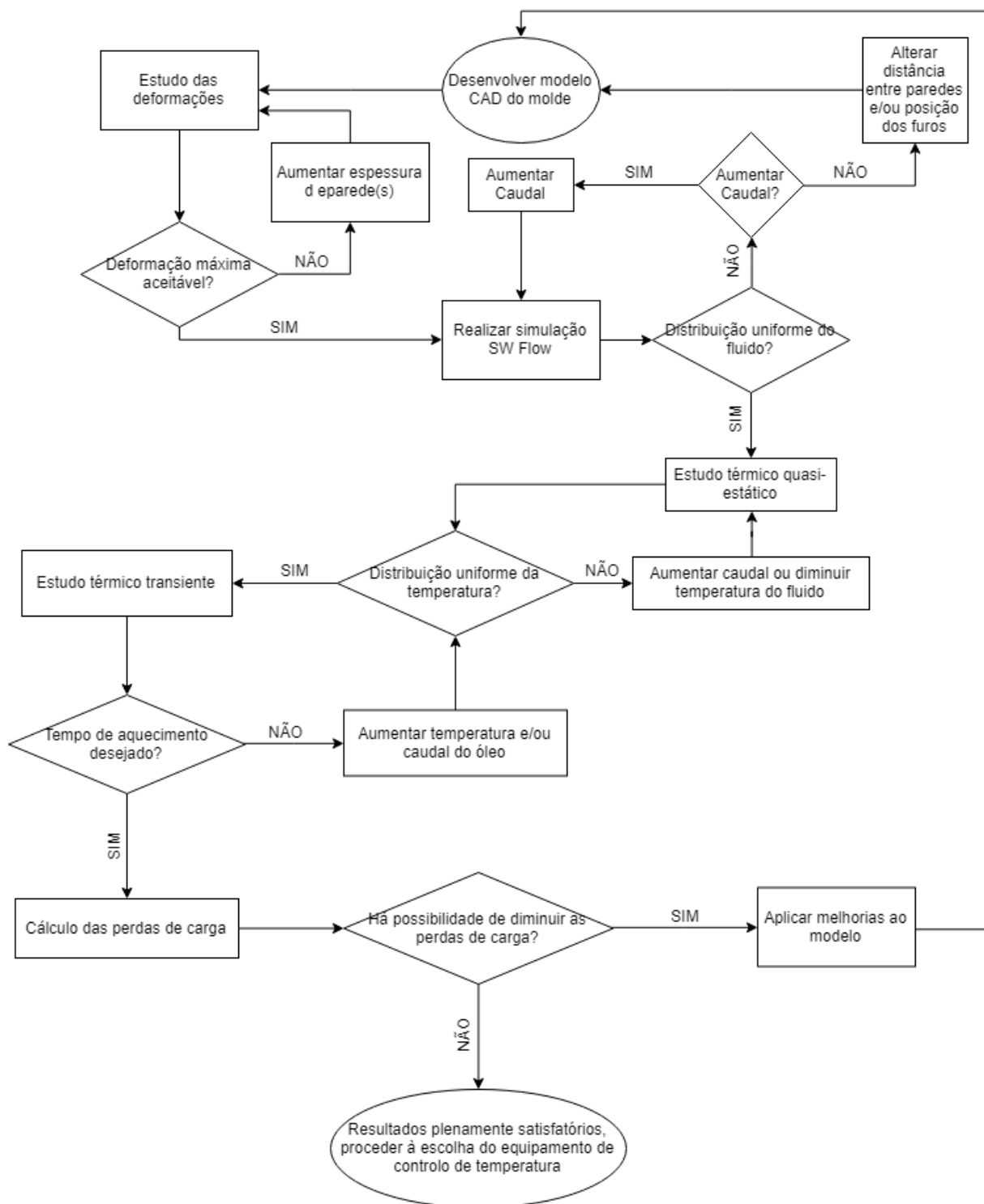


Figura 53 - Fluxograma do método

## 12. Sugestão de Trabalhos Futuros

Apesar de nesta dissertação ter sido realizado algum trabalho relativamente ao estudo da possibilidade de produção de peças por rotomoldagem com moldes aquecidos a óleo há ainda vários pontos que, por motivos de tempo, não puderam ser aprofundados ou considerados na mesma.

Um desses pontos prende-se com o arrefecimento do molde. Apesar de ainda não ter sido aplicado na prática foi já mencionado em bibliografia que uma forma de melhorar o aquecimento seria fazê-lo desde o interior do molde [1]. Esta característica iria permitir um arrefecimento mais rápido, pois este não estaria tão limitado pelas propriedades do metal do molde. Por outro lado, um dos pontos mais atrativos da solução apresentada nesta dissertação é o facto de o arrefecimento ser mais uniforme. Um dos fatores que limita o tempo de arrefecimento é o facto de poderem surgir deformações na peça se esta for arrefecida demasiado rápido. Isto deve-se à expansão térmica do material que ocorre de forma não-uniforme se houver uma variação considerável de temperaturas entre a superfície interior e exterior das paredes da peça. Realizando o arrefecimento também a partir do interior consegue-se melhor controlo sobre este gradiente de temperatura, podendo ultrapassar as limitações em termos de redução do tempo de arrefecimento.

Tal como foi mencionado ao longo desta dissertação, o tempo de ciclo pode ser facilmente manipulado, alterando o caudal ou a temperatura do fluido. Existe assim a possibilidade de o diminuir bastante, como já foi discutido. Uma grande limitação relativamente ao tempo de ciclo prende-se com as propriedades químicas do polímero, que poderão ser danificadas como resultado de um aquecimento ou arrefecimento demasiado brusco. Assim, um importante trabalho a realizar será o estudo desses mesmos limites para o material considerado. Certamente que poderá ser estudado empiricamente, por tentativa erro, como é muito comum em várias áreas da rotomoldagem. No entanto, seria interessante um estudo teórico e experimental, aprofundado e fundamentado deste aspeto.

Um outro fator que poderia ser tido em consideração é o material do molde. Sendo o objetivo a transmissão de energia, sob a forma de calor, até à superfície interior do molde (em contacto com o polímero) fará sentido utilizar um material com um coeficiente de condução elevado e um calor específico baixo. Assim, uma maior percentagem da energia fornecida chegará ao polímero, num intervalo de tempo menor. No entanto, na camada exterior (que separa o fluido do ar ambiente) não há essa preocupação. Certo é que quanto menor o calor específico menor será a energia absorvida pela parede exterior, mas, no entanto, quanto menor for o seu coeficiente de condução mais lentamente aumentará a temperatura da superfície em contacto com o ar. Este fator é positivo por dois aspetos. Quanto menor a temperatura exterior menor será o coeficiente de convecção e menores as perdas por

convecção. Por outro lado, se o coeficiente de condução da parede exterior for maior que o da parede interior a energia chegará mais facilmente ao interior do molde. No entanto, o fabrico de um molde assim será certamente mais complexo e por isso mais dispendioso. Assim, seria necessário fazer um estudo da relação custo / benefício desta solução.

Por forma a diminuir o investimento inicial desta solução, seria benéfico uma análise mais aprofundada das soluções disponíveis no mercado em termos de equipamento de controlo de temperatura. Esse trabalho foi feito nesta dissertação conforme as limitações de tempo e recursos. No entanto, será do interesse da empresa, havendo intuito de compra, a procura de um equipamento que implique um investimento menor.

Como foi mencionado no início desta dissertação, seria também interessante um estudo da relação do  $c_p$  do óleo com a uniformidade espacial da temperatura do molde, de forma a poder aprimorar o método de escolha do óleo.



# 13. Discussão e Conclusões

Conseguiu-se mostrar que o aquecimento a óleo é uma alternativa bastante vantajosa, pois permite uma redução importante de custos e também de espaço em chão de fábrica, quando comparada com as máquinas atuais.

Como não poderia deixar de ser, esta dissertação está mais focada no aquecimento do molde, ficando assim várias questões muito interessantes por estudar. Uma delas é a distribuição ideal da temperatura, ou seja, qual a diferença máxima de temperaturas no molde de forma a garantir uma distribuição uniforme do polímero e uma espessura constante da peça. Outra questão importante está relacionada com o tempo de ciclo. Como foi mencionado este poderá ser reduzido em cerca de 50% (ou mais, para temperaturas de fluido superiores à considerada), no entanto não se sabe se o polímero poderá suportar o aquecimento num intervalo de tempo tão curto, sem perder as suas capacidades.

Com a aplicação de aquecimento a óleo em moldes de rotomoldagem prevê-se que a redução nos custos de produção ronde os 10%, com uma redução de 12% dos custos energéticos e de cerca de 50% no tempo de ciclo. A redução dos custos energéticos é apelativa pelos motivos óbvios, enquanto que uma redução de tempo de ciclo tem vários benefícios, entre os quais está não só uma redução de custos como uma melhoria da capacidade da empresa de responder às necessidades do cliente.

Por limitações externas não foi possível um estudo mais aprofundado, no entanto o objetivo primeiro da dissertação era o estudo da redução de custos e os resultados nesse aspeto foram bastante positivos.



## Referências

- [1] R. J. Crawford and J. L. Throne, *Rotational molding polymers BT - Rotational Molding Technology*. William Andrew Inc., 2002.
- [2] Mikell Knights, “The Next Generation of Rotomolding Technology : Plastics Technology,” 2001. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/the-next-generation-of-rotomolding-technology>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- [3] J. Carvalho, *Transferência de Calor e Eficiência Energética*, 1º. Lisboa: Nova Editorial FCT, 2017.
- [4] Regloplas, “Temperature Control Unit 300L ( D )/ 350L ( D ).”
- [5] L. A. Oliveira and A. G. Lopes, *Mecânica dos fluidos*, 2º. Lisboa: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2006.
- [6] J. P. Conde, *Apontamentos Dinâmica dos Fluidos II*. Lisboa: DEMI - FCT UNL, 2018.
- [7] F. M. White, “Fluid Mechanics,” *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 157, no. 1, Jun. 1947.
- [8] A. C. Ugural, *Stresses in Plates and Shells*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1981.
- [9] G. Vio, D. Munk, and D. Verstraete, “Transient Temperature Effects on the Aerothermoelastic Response of a Simple Wing,” *Aerospace*, vol. 5, no. 3, p. 71, Jul. 2018.
- [10] Y. Çengel, *HEAT TRANSFER - A Practical Approach*, 2nd ed. Nevasa, EUA: McGraw Hill, 2011.
- [11] “Dry Air Properties.” [Online]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d\\_973.html](https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html). [Accessed: 04-Jul-2019].
- [12] “Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures.” [Online]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html). [Accessed: 04-Jul-2019].
- [13] P. Foteinopoulos, A. Papacharalampopoulos, and P. Stavropoulos, “Journal of Manufacturing Science and Technology On thermal modeling of Additive Manufacturing processes,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 66–83, 2018.
- [14] “Leonardo - Persico Group.” [Online]. Available: <https://www.persico.com/en/industries/industrial/technologies/rotomoulding/machinery/leonardo>. [Accessed: 29-Jan-2019].
- [15] W. Bonazzi and P. R. S, “Energy Saving Improvements on Rotomoulding Machines,” pp. 1–12, 2012.



## Bibliografia

- U. S. A. M. C. HEADQUARTERS, “Engineering Design Rotational Molding of Engineering Design Handbook,” no. April, 1975.
- W. M. Rohsenow and J. R. Hartnett, *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed. Michigan: McGraw Hill, 1998.
- R. Perry, S. Perry, D. . Green, and J. Maloney, *Chemical Engineers’ Handbook*, 7th ed. 1997.
- M. Brito, A. Matos, and S. S.Mendes, *Manual do Projectista Para Moldes de Injeção de Plástico*. 2004.
- M. E.Smith, “Operating a Hot Oil Heat Transfer Fluid System is Not Too Hard When You Know The Basics,” *Die Cast. Eng.*, no. September, 2005.
- C. Persico, “Device and mold for rotational molding of plastic materials,” Sep. 2005
- Persico, “Smart Leonardo Technology by Persico.” [Online]. Available: <http://www.leonardosmart.com/>. [Accessed: 07-Feb-2019].
- M. Kutz, *Applied Plastics Engineering Handbook*, 2nd ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016.
- N. Mansfield, “A history of Rotational Molding,” *Plastiquarian n19*, 1997.
- Paul Nugent, “Rotational Molding Industry Overview,” *RotoWorld Magazine*. [Online]. Available: <https://rotoworldmag.com/rotational-molding-industry-overview/>. [Accessed: 19-Jan-2019].
- L. T. First-rate Mold Solution Co., “Introduction to History of rotational molding | Professional industrial design services, High value-added mold and High quality product suppliers,” 2009. [Online]. Available: <https://www.firstratemold.com/introduction-to-history-of-rotational-molding/>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- “History of Rotational Moulding.” [Online]. Available: <http://www.rotationalmoulding.ca/history.htm>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- “Rotational Molding Companies | Rotational Molding Services.” [Online]. Available: <https://www.rotationallymoldedplastics.com/>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- P. W. Klein, “MOLD MAKING FOR ROTATIONALLY MOLDED PLASTICS PRODUCTS,” pp. 1–13, 2008.
- T. B. Comisso, C. A. S. de Lima, and B. de M. Carvalho, “Estudo experimental do processo

de rotomoldagem de PELBD: efeitos sobre a morfologia e estabilidade dimensional,” *Polímeros*, vol. 23, no. 1, pp. 97–107, 2013.

- T. D. Bennett, “Correlations for the Graetz problem in convection – Part 1: For round pipes and parallel plates,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 136, pp. 832–841, 2019.
- F. M. White, “Fluid Mechanics,” *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 157, no. 1, Jun. 1947.
- M. D. Monzón, P. Bordón, A. N. Benítez, M. Kearns, P. M. Hernández, and M. D. Marrero, “Global efficiency of innovative rotational mold directly heated by thermal fluid,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 9, pp. 1998–2005, Sep. 2012.
- N. W. ON, “Design of a new making seamless hollow plastic parts” Hong Kong Polytechnic University, 2016.

# ANEXO 1.



## GALP TERMOIL 32

### Descrição

Óleos minerais inibidos contra a oxidação, para transferência de calor em instalações térmicas, funcionando por circulação do fluido térmico em fase líquida.

### Propriedades

- ✧ Boa estabilidade térmica e grande resistência à oxidação permitindo uma longa duração em serviço;
- ✧ Elevado índice de viscosidade;
- ✧ Grande fluidez permitindo uma circulação fácil a baixas temperaturas;
- ✧ Não ataca os metais normalmente utilizados nas instalações térmicas;
- ✧ Compatível com elastómeros do tipo NBR.

### Aplicações

- ✧ Unidades de transferência de calor de instalações industriais diversas, nomeadamente petrolífera, papel, têxteis, entre muitas outras.
- ✧ Pode também ser aplicado em radiadores a óleo (aquecedores).

### Dados Técnicos

Testes	Métodos	Resultados
Massa Volúmica a 15 °C, kg/l	ASTM D 1298 / D 4052	0,871
Viscosidade Cinemática a 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445 / D 7042	32
Índice de Viscosidade	ASTM D 2270	106
Ponto de Fluxão, °C, máx.	ASTM D 97 / D 6892	-12
Ponto de Inflamação, COC, °C	ASTM D 92	236
Ponto de Inflamação, °C PM	ASTM D 93	218
Perdas por Evaporação (Noack), %	DIN 51581 / CEC-L-40-93	16,3
Número de Acidez, mgKOH/g	ASTM D 664 / D 974	0,06
Espumas, ml/ml, máx.	ASTM D 892	10/0
- SEQ. I Tend/Est.		20/0
- SEQ. II Tend/Est.		20/0
- SEQ. III Tend/Est.		20/0
Libertação de Ar a 50 °C, min.	IP 313	6,7
Resíduo Carbonoso Ramsbottom, %	ASTM D 524	0,13
Ensaio de Oxidação	IP 048	1,17
- Relação de Viscosidade		0,57
- Aumento de Res. Carb. Rams., % (m/m)		
Corrosão ao Cobre, 100 °C, 3 h	ASTM D 130 / D 4048	1a
Temperatura da Aplicação, °C, max.		280 (Sistemas Fechados) 180 (Sistemas Abertos)
Pressão de Vapor / Temperatura		Anexo
Condutividade Térmica / Temperatura		Anexo
Calor Específico / Temperatura		Anexo
Viscosidade / Temperatura		Anexo
Curva de Arrefecimento / Temperatura		Anexo

Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P1/5

FPC023 - R11  
GL15003b

# GALP TERMOIL 32



- ✧ Densidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) =  $-0,6181 \times T(^{\circ}\text{C}) + 882,5$
- ✧ Capacidade Calorífica ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) =  $0,0088310 \times T(^{\circ}\text{C}) + 1,5405$
- ✧ Condutividade Térmica ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) =  $-0,00012 \times T(^{\circ}\text{C}) + 0,14993$
- ✧ Viscosidade Cinemática ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ) =  $e(812,98/(T(^{\circ}\text{C})+100,19) - 2,32)$
- ✧ Pressão de Vapor (kPa) =  $e(-6139,91/(T(^{\circ}\text{C})+169,95) + 18,49)$

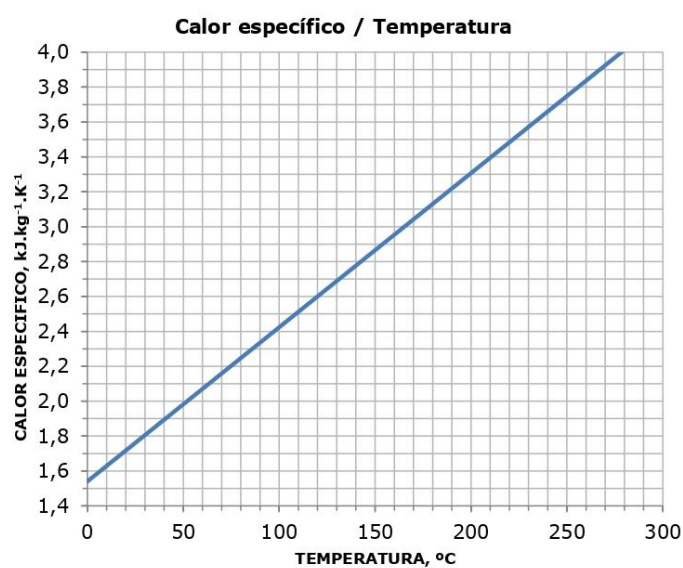
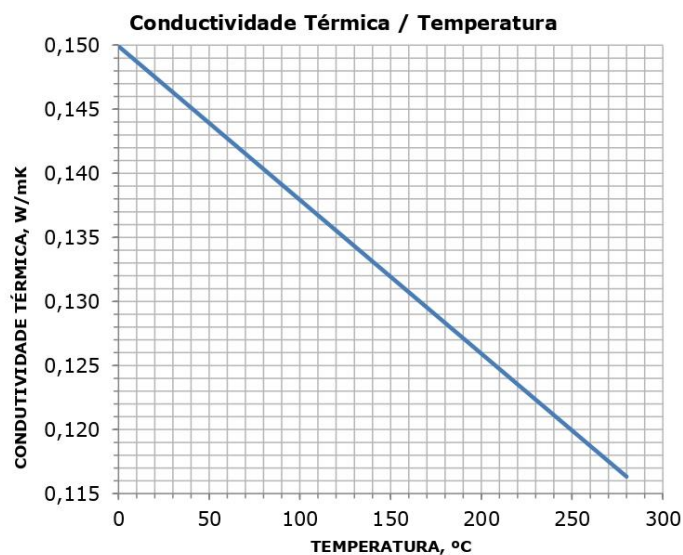
Temperatura °C	Densidade kg/l	Condutividade Térmica ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Capacidade Calorífica $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Viscosidade Cinemática ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	Pressão de vapor (kPa)
0	882.5	0.150	1.54	328.4	-
10	876.3	0.149	1.63	157.3	-
20	870.1	0.148	1.72	85.1	-
30	864.0	0.146	1.81	50.6	-
40	857.8	0.145	1.89	32.4	-
50	851.6	0.144	1.98	22.0	-
60	845.4	0.143	2.07	15.7	-
70	839.2	0.142	2.16	11.7	-
80	833.1	0.140	2.25	9.0	-
90	826.9	0.139	2.34	7.1	-
100	820.7	0.138	2.42	5.7	-
110	814.5	0.137	2.51	4.7	-
120	808.3	0.136	2.60	3.9	-
130	802.1	0.134	2.69	3.4	0.1
140	796.0	0.133	2.78	2.9	0.3
150	789.8	0.132	2.87	2.5	0.5
160	783.6	0.131	2.95	2.2	0.9
170	777.4	0.130	3.04	2.0	1.5
180	771.2	0.128	3.13	1.8	2.6
190	765.1	0.127	3.22	1.6	4.2
200	758.9	0.126	3.31	1.5	6.6
210	752.7	0.125	3.40	1.4	10.3
220	746.5	0.124	3.48	1.2	15.6
230	740.3	0.122	3.57	1.2	23.1
240	734.2	0.121	3.66	1.1	33.5
250	728.0	0.120	3.75	1.0	47.9
260	721.8	0.119	3.84	0.9	67.3
270	715.6	0.118	3.92	0.9	93.1
280	709.4	0.116	4.01	0.8	127.0

Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P2/5

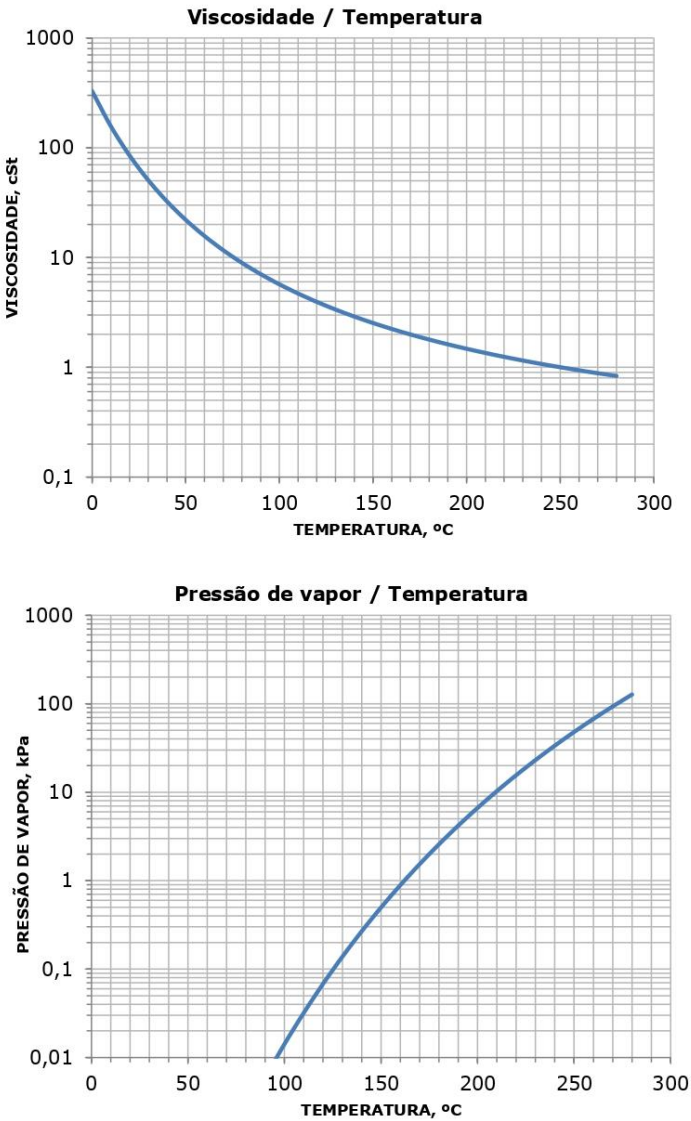
FPC023 - R11  
GL15003b





Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

FPC023 - R11  
GL15003b  
P3/5



Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

FPC023 - R11  
GL15003b  
P4/5

# ANEXO 2.



## GALP TERMOIL SY

### Descrição

Fluido térmico sintético de base alquilo diarilo de elevada pureza e performance, extremamente estável a elevadas temperaturas.

### Propriedades

- ✧ Boa fluidez permitindo uma circulação fácil a baixas temperaturas.
- ✧ Boa estabilidade térmica e resistência à oxidação, permitindo longa duração em serviço.
- ✧ Não ataca os metais normalmente utilizados nas instalações térmicas.

### Aplicações

- ✧ Especialmente recomendado para utilização em sistemas de transferência de calor, a operar à pressão atmosférica. Este produto é recomendado em diversas aplicações de recuperação de calor entre as quais se destacam: fabrico de resinas, produção de fibras e filmes de poliéster, destilação de anidrido ftálico, desodorização de ácidos gordos, produção de fenóis, extrusão e polimerização de poliamidas e pré-aquecimento do ar de combustão em fornos siderúrgicos e petroquímicos.

### Dados Técnicos

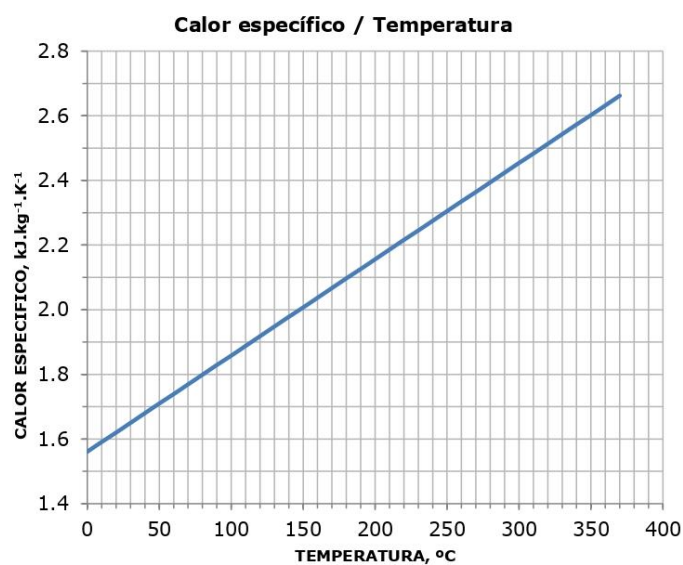
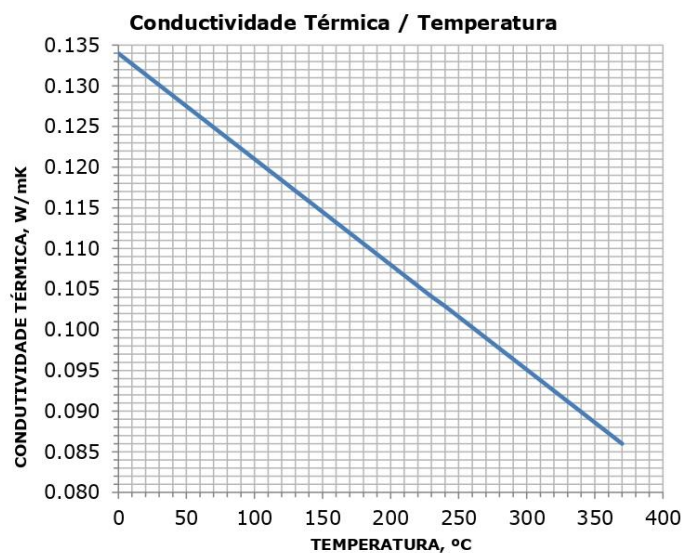
Testes	Métodos	Resultados
Aparência	Visual	Límpida
Massa Volúmica a 15 °C, kg/l	ASTM D 1298 / D 4052	1.03
Viscosidade Cinemática a 0 °C, mm²/s	ASTM D 445 / D 7042	211.9
Viscosidade Cinemática a 40 °C, mm²/s	ASTM D 445 / D 7042	14.7
Viscosidade Cinemática a 100 °C, mm²/s	ASTM D 445 / D 7042	2.85
Ponto de Ebulição, °C	ASTM D 1120	353
Ponto de Inflamação, °C	ASTM D 93	194
Latitude de Operação, °C		
– Sistemas Abertos		-20 a 170
– Sistemas Fechados		-20 a 320

Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P1/3

FPC680-R3  
GL15003b

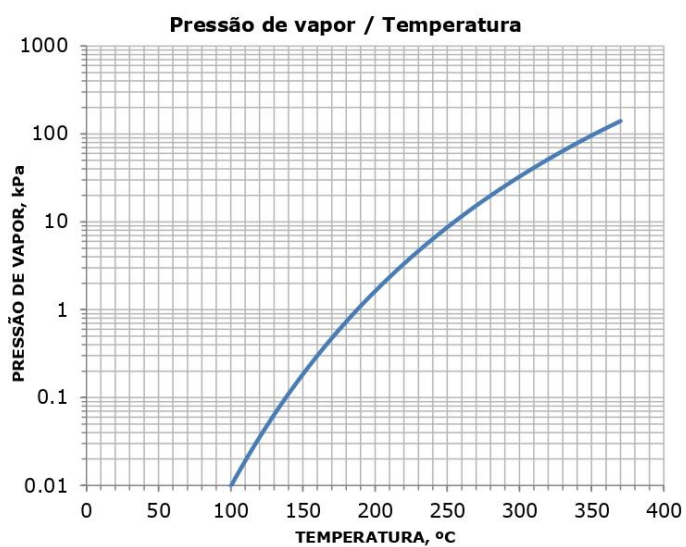
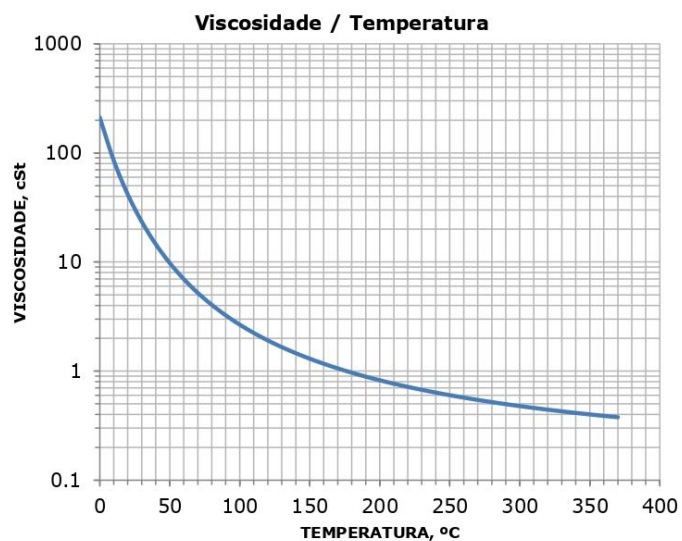
## GALP TERMOIL SY



Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

FPC680-R3  
GL.15003b  
P2/3

## GALP TERMOIL SY



Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P3/3  
FPC680-R3  
GL15003b



# ANEXO 3.



## GALP TERMOIL SY HF

### Descrição

Fluido sintético para a transferência de calor. Formulado com bases sintéticas e aditivos que lhe conferem uma excelente estabilidade térmica e protecção à corrosão. Devido ao seu elevado ponto de inflamação, confere uma segurança adicional às instalações.

### Propriedades

- ✦ Excelente estabilidade térmica e resistência à oxidação, permitindo longa duração em serviço.
- ✦ Elevado índice de viscosidade.
- ✦ Boa fluidez permitindo uma circulação fácil a baixas temperaturas.
- ✦ Não ataca os metais normalmente utilizados nas instalações térmicas.
- ✦ Compatível com elastómeros do tipo NBR.

### Aplicações

Recomendado como fluido de transferência de calor em instalações industriais, nomeadamente alimentar, papel, têxtil entre outras

Suporta temperaturas até:

- Sistemas fechados: 320 °C
- Sistemas abertos: 220 °C

### Dados Técnicos

Testes	Métodos	Resultados
Massa Volúmica a 15 °C, kg/l	ASTM D 1298 / D 4052	0,860
Viscosidade Cinemática a 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445 / D 7042	35,0
Índice de Viscosidade	ASTM D 2270	128
Ponto de Fluxão, °C	ASTM D 97 / D 6892	-12
Ponto de Inflamação, COC, °C	ASTM D 92	245
Ponto de Inflamação, °C	ASTM D 93	238
Perdas por Evaporação (Noack), %	DIN 51581 / CEC-L-40-93	8,0
Número de Acidez, mgKOH/g	ASTM D 664 / D 974	<0,07
Espumas, ml/ml		10/0
- SEQ. I Tend/Est.	ASTM D 892	20/0
- SEQ. II Tend/Est.		20/0
- SEQ. III Tend/Est.		20/0
Resíduo Carbonoso Ramsbottom, %	ASTM D 524	0,10
Resíduo Carbonoso Micro-Conradson	ASTM D 4530	0,05
Corrosão ao Cobre, 100 °C, 3 h	ASTM D 130 / D 4048	1a

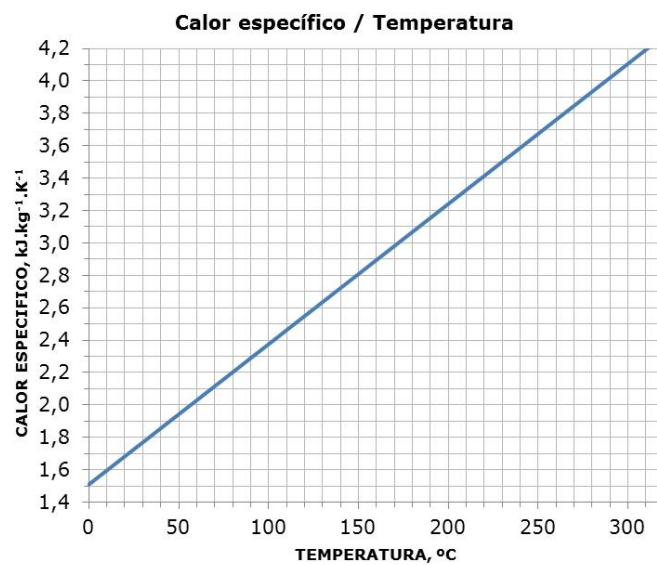
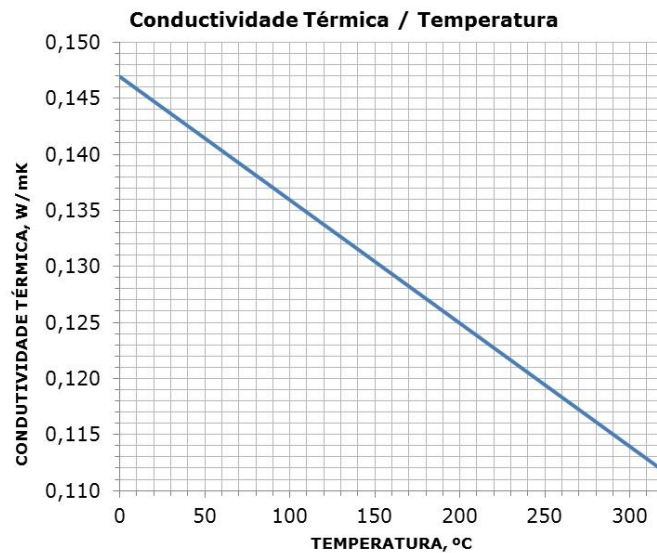
Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P1/5

FPC910  
GL15003b



## GALP TERMOIL SY HF



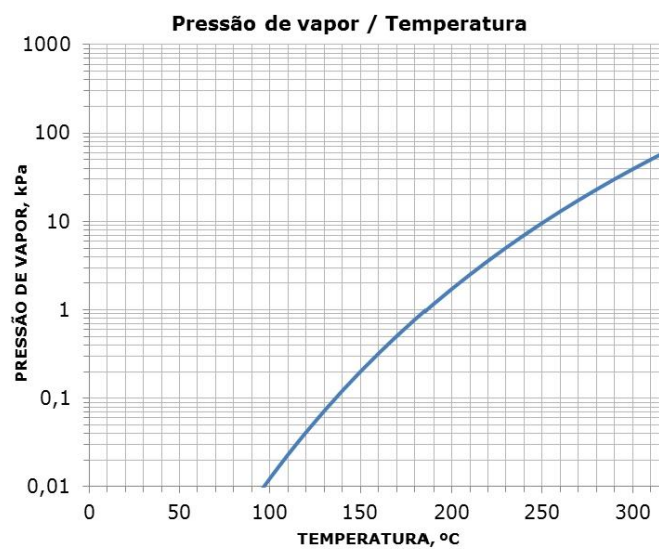
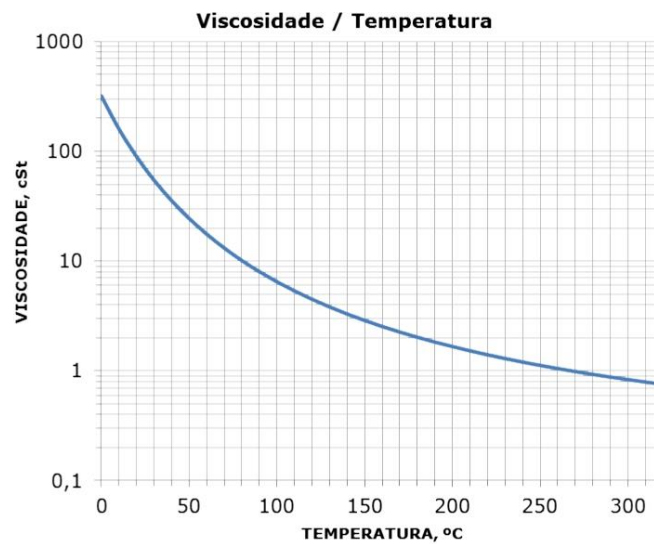
Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P2/5

FPC910  
GL 15003b



## GALP TERMOIL SY HF



Os valores apresentados são indicativos não constituindo especificação podendo apresentar ligeiras variações.  
Para obter FDS contacte o seu gestor de cliente.  
Proteja o meio ambiente: não deposite os óleos usados nos esgotos, cursos de água ou solo.

P3/5

FPC910  
GL 15003b



## ANEXO 4.



### 300LD

The dual-zone temperature control unit for thermal oil up to 300 °C: 300LD

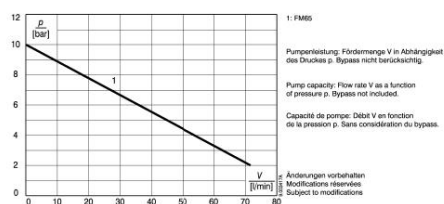
- High heating capacity max. 80 kW (2 x 40 kW)
- Solid-state relay instead of heating contactor
- Leak-free pump with magnetic coupling
- Microprocessor-controlled control system RT100
- Swiss Quality

Technical data		
<b>Outlet temperature</b>		
max.	°C	300
<b>Heat transfer fluid</b>		
Oil		
Filling quantity	l	24
Expansion volume	l	20
<b>Heating capacity at 400 V</b>		
Standard	kW	20
Standard	kW	40
<b>Cooling capacity</b>		
max.	kW	160
at outlet temperature	°C	280
Cooler type		1K
<b>Pump capacity</b>		
Type		FM65
Flow rate max.	l/min	90
Pressure max.	bar	10
Power consumption	kW	2,8
<b>Control</b>		
Type		RT100
Measuring mode		Pt100
<b>Operating voltage</b>		
Standard	V/Hz	400/50 3PE
<b>Connections</b>		
Outlet/inlet		G3/4" IG
Cooling water supply		G3/4"
<b>Dimensions</b>		
Width	mm	541
Height	mm	1356
Depth	mm	1474
<b>Weight</b>		
Standard	kg	365
<b>Colour</b>		
Standard	RAL	9006/7016
<b>Ambient temperature</b>		
max.	°C	40
<b>Noise level</b>		
max.	db (A)	70

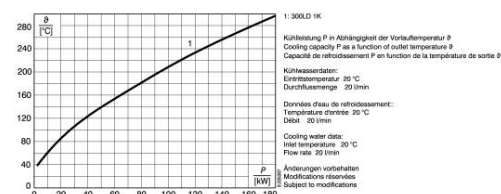
Equipment	
RT100 control system	●
Solid-state relay (SSR) instead of heating contactor	●
Unit in IP54 protection degree	●
Second level	●
Leak-free pump	●
Filter in the main circuit	●
Filter in the cooling water circuit	●
Water circuit of non-rusting materials	●
Pressure gauge outlet	●
Pressure gauge inlet	●
Bypass cooler	○
Inert gas blanket	—
Electronic flow measurement	○

● Standard ○ Option — Not available ● / ○ / — Device-related

### Pump capacity



### Cooling capacity



### Regloplas

Flurhofstrasse 158 • 9006 St.Gallen • Switzerland Tel: +41-71-282 58 00 •  
Fax: +41-71-282 58 40 • info@regloplas.com • www.regloplas.com

## ANEXO 5.



### Continuous Temperature Control

If your process requires elevated temperature control between 100° and 500°F, Mokon's HTF 500 Series ensures continuous process temperature control. Available in two models, 10 or 20 GPM, in single, dual and triple zone configurations with varying heating capacities to match your process temperature control applications.

The HTF 500 Series features Mokon's unique heating philosophy and cool oil reservoir design, offering the safest and most efficient means of cooling available.

A self-tuning, microprocessor-based controller with advanced PID overshoot protection ensures stable, straight-line control for extreme accuracy.

All Mokon HTF systems come standard with a UL 508A (Underwriters Laboratories) labeled electrical sub-panel and meet NFPA 79 (National Fire Protection Association) electrical safety standards. Systems include motor, heater and transformer fusing and wiring practices to ensure operator safety.



*Designed to Perform. Built to Last.*

**HTFSystem**  
500 Series

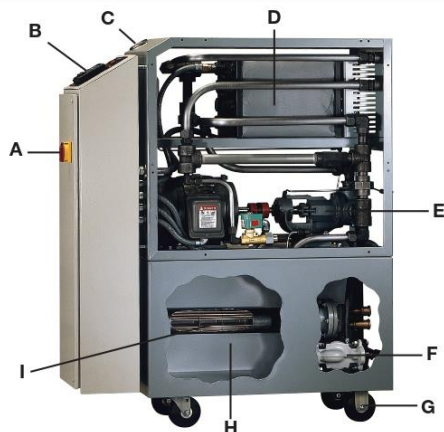
*Heat Transfer Fluid System*

*Up to 500°F (260°C)*

- Sleek vertical design
- Continuous flow cool oil reservoir
- Energy efficient insulated heater manifold
- High temperature and low pressure safety switches
- Microprocessor-based controller
- UL 508A labeled electrical sub-panel
- Meets NFPA 79 standards



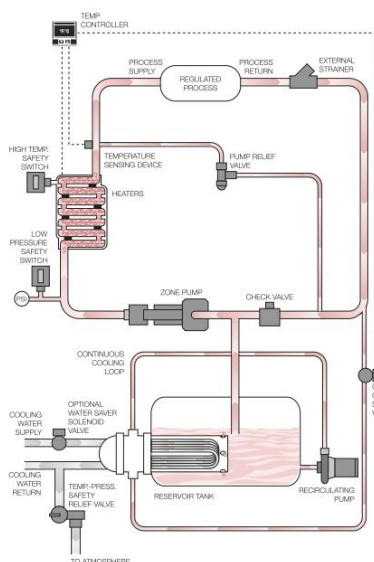
# Continuous Temperature Control



## Standard Features

- A** NEMA rated electrical enclosure with safety door disconnect switch
- B** Microprocessor-based controller mounted in operator-friendly orientation
- C** Glycerin-filled pressure gauges
- D** Insulated manifold with heaters
- E** Positive displacement pump
- F** Recirculating pump
- G** Heavy-duty ball bearing casters
- H** Continuous flow cool oil reservoir
- I** Cooling heat exchanger
- J** NFPA 79 and UL 508A labeled electrical sub-panel (not shown)

## 500 Series Flow Schematic



For more information on Mokon's HTF 500 Series or other products, call our sales department today.

## Specifications—HTF System 500 Series (100°F-500°F)

Horsepower, Flow Rate and Connections	# of Zones	Heating Capacity kW per Zone (total kW)	Total Amps*	Reservoir Tank Volume (gallons)	Cabinet Dimensions L x W x H (inches)	Shipping Weight (lbs.)
1 Hp 10 GPM and up to 60 PSI	1	6	9.4	18	41 x 15 x 51	378
		12	17.0	18	41 x 15 x 51	406
		18	24.5	18	41 x 15 x 62	456
		24	32.0	18	41 x 15 x 62	484
		30	39.5	38	41 x 30 x 51	628
		36	47.1	38	41 x 30 x 51	656
	2	6 (12)	18.8	38	41 x 30 x 51	674
		12 (24)	34.0	38	41 x 30 x 51	730
		18 (36)	49.0	38	41 x 30 x 62	822
		24 (48)	64.0	38	41 x 30 x 62	878
	3	6 (18)	28.2	58	41 x 45 x 51	970
		12 (36)	51.0	58	41 x 45 x 51	1054
2 Hp 20 GPM and up to 100 PSI	1	6	10.9	18	41 x 15 x 51	432
		12	18.5	18	41 x 15 x 51	460
		18	26.0	18	41 x 15 x 62	510
		24	33.5	18	41 x 15 x 62	538
		30	41.0	38	41 x 30 x 51	682
		36	48.6	38	41 x 30 x 51	710
	2	6 (12)	21.8	38	41 x 30 x 51	802
		12 (24)	37.0	38	41 x 30 x 51	838
		18 (36)	52.0	38	41 x 30 x 62	930
		24 (48)	67.0	38	41 x 30 x 62	986
	3	30 (60)	82.0	58	41 x 45 x 62	1216
		36 (72)	98.1	58	41 x 45 x 62	1272
		48 (96)	128.2	58	41 x 45 x 74	1456
	3	6 (18)	32.7	58	41 x 45 x 51	1216
		12 (36)	55.5	58	41 x 45 x 51	1300
		18 (54)	78.0	58	41 x 45 x 62	1434
		24 (72)	101.4	58	41 x 45 x 62	1518

\* 460/3/60 (for 230V, double the listed amps) • Standard heat exchanger = 3.6 sq. ft. for all HTF Systems

Technical data shown is subject to change without notice. The company will endeavor to supply the equipment as illustrated but reserves the right to make dimensional and other design changes as required.



Designed to Perform. Built to Last.

2150 Elmwood Avenue, Buffalo, New York 14207  
Phone: 716-876-9951 ■ Fax: 716-874-8048  
www.mokon.com ■ E-mail: sales@mokon.com



HTF500 01/16 MOK7607

# ANEXO 6.

## 550° OIL UNITS

	MODEL	UNIT DIMENSIONS	TEMP RANGE (F)	HEATER CAPACITY	PUMP CAPACITY	HP	COOLING CAPACITY <sup>1</sup>
6 KW	T-1011M	16" X 30" X 46"	50-550	6KW	10 GPM@30 PSI	3/4	SEE TABLE
	T-1012M	16" X 30" X 46"	50-550	6KW	18 GPM@30 PSI	1	SEE TABLE
	T-1013M	16" X 30" X 46"	50-550	6KW	18 GPM@50 PSI	1-1/2	SEE TABLE
	T-1014M	16" X 30" X 46"	50-550	6KW	24 GPM@50 PSI	2	SEE TABLE
12 KW	T-1021M	16" X 30" X 46"	50-550	12KW	10 GPM@30 PSI	3/4	SEE TABLE
	T-1022M	16" X 30" X 46"	50-550	12KW	18 GPM@30 PSI	1	SEE TABLE
	T-1023M	16" X 30" X 46"	50-550	12KW	18 GPM@50 PSI	1-1/2	SEE TABLE
	T-1024M	16" X 30" X 46"	50-550	12KW	24 GPM@50 PSI	2	SEE TABLE
18 KW	T-1032M	16" X 30" X 46"	50-550	18KW	18 GPM@30 PSI	1	SEE TABLE
	T-1033M	16" X 30" X 46"	50-550	18KW	18 GPM@50 PSI	1-1/2	SEE TABLE
	T-1034M	16" X 30" X 46"	50-550	18KW	24 GPM@50 PSI	2	SEE TABLE
	T-1035M	42" X 38" X 55"	50-550	18KW	50 GPM@50 PSI	3	SEE TABLE
24 KW	T-1042M	16" X 30" X 46"	50-550	24KW	18 GPM@30 PSI	1	SEE TABLE
	T-1043M	16" X 30" X 46"	50-550	24KW	18 GPM@50 PSI	1-1/2	SEE TABLE
	T-1044M	16" X 30" X 46"	50-550	24KW	24 GPM@50 PSI	2	SEE TABLE
	T-1045M	42" X 38" X 55"	50-550	24KW	50 GPM@50 PSI	3	SEE TABLE
36 KW	T-1054M	16" X 30" X 46"	50-550	36KW	24 GPM@50 PSI	2	SEE TABLE
	T-1055M	42" X 38" X 55"	50-550	36KW	50 GPM@50 PSI	3	SEE TABLE
	T-1056M	42" X 38" X 55"	50-550	36KW	90 GPM@50 PSI	5	SEE TABLE
48 KW	T-1065M	42" X 38" X 55"	50-550	48KW	50 GPM@50 PSI	3	SEE TABLE
	T-1066M	42" X 38" X 55"	50-550	48KW	90 GPM@50 PSI	5	SEE TABLE

COOLING TABLE <sup>1</sup>	
UNIT CODE	COOLING CAPACITY
0	HEAT ONLY
1	58,000 BTU/HR (17 KW)
2	147,000 BTU/HR (43 KW)
3	256,000 BTU/HR (75 KW)
4	402,000 BTU/HR (118 KW)
5	458,000 BTU/HR (134 KW)

<sup>1</sup> COOLING IS CALCULATED USING STANDARD FLOW CONDITIONS WITH 65 °F COOLING AND A PROCESS TEMPERATURE OF 550 °F





## ANEXO 7.

```

1 %Temperatura do molde em função do tempo
2
3 function aquecimento(Q,deltat)
4
5     h_oleo=coef_conv_oleo(Q);
6     h_ar=6.4;
7
8     A=84244.31*(10^-6); %[m^2] Área da parede considerada
9     e=10*(10^-3); %[m] espessura da parede considerada
10    m_parede=2700*A*e; %[kg] massa da parede
11    m_ar=2233.41*(10^-3); %[kg] massa de ar (meio molde)
12
13    cp_al=921.095601; %[J/kg.K]
14    cp_ar=1004.831565; %[J/kg.K]
15
16    T_oleo=225;
17    Ti_molde=40;
18    Ti_ar=25;
19
20    T_molde=zeros(1,15); %Cria um vetor para registrar as temperaturas
21    t=zeros(1,15); %Cria um vetor para registrar os tempos
22    T_ar=zeros(1,15); %Cria um vetor para registrar as temperaturas
23
24    i=1;
25    tempo=deltat;
26
27    Tf_molde=Ti_molde;
28    Tf_ar=Ti_ar;
29
30    while Tf_molde<200 %t<1200
31
32        Q_in=h_oleo*A*(T_oleo-Ti_molde)*deltat;
33        Q_out=h_ar*A*(Ti_molde-Ti_ar)*deltat;
34
35        Tf_molde=(Q_in-Q_out+(m_parede*cp_al*Ti_molde))/(m_parede*cp_al);
36
37        Tf_ar=(Q_out+m_ar*cp_ar*Ti_ar)/(m_ar*cp_ar);
38
39        T_molde(i)=Tf_molde;
40
41        t(i)=tempo;
42        T_ar(i)=Tf_ar;
43
44        i=i+1;
45        tempo=tempo+deltat;
46
47        Ti_molde=Tf_molde;
48        Ti_ar=Tf_ar;
49
50    end
51
52    ans=tempo
53    figure(1);
54    plot(t,T_molde)
55    title('Temperatura Molde');
56    xlabel('Tempo [s]');
57    ylabel('Temperatura [°C]');
58
59    figure(2);
60    plot(t,T_ar)
61    title('temperatura ar');
62    xlabel('Tempo [s]');
63    ylabel('Temperatura [°C]');
64
65
66 endfunction
67

```



## ANEXO 8.

```
1 %Cálculo do coeficiente de convecção forçada numa placa plana
2
3 function res = coef_conv_oleo(Q)
4 L=0.275; %[m]
5 k=0.1145; %[W/m°C] coef. condução óleo
6 miu=1.4*(10^-3); %[Pa.s] viscosidade dinâmica
7 cp=1.95*(10^3); %[J/kg°C]
8 A=0.00151; %[m^2] área hidráulica
9 v_=1.4*(10^-6); %[m^2/s] viscosidade cinemática
10 n_moldes=8;
11
12 v=(Q/60000)/n_moldes/A; %[m/s] velocidade
13 Re=(v*L)/v_; %Reynolds para placa plana
14 Pr=miu*cp/k; %Numero de Prandtl
15
16 if Re<500000
17 Nu=0.664*(Re^0.5)*(Pr^(1/3)); %Nusselt para Re<500000
18 else
19 Nu=0.037*(Re^0.8)*(Pr^(1/3)); %Nusselt para Re>500000
20 end
21
22 h=Nu*k/L; %Coeficiente de convecção do óleo
23
24 res=h;
25 end
```



## ANEXO 9.

```
1 %coef_conv_ar
2
3 g=9.81;           %Aceleração gravitica
4 beta=3.8e-3;      %coeficiente de expansão térmica do fluido
5 Tp=112.5;         %Temperatura de película
6 T=25;            %Temperatura do ar
7 L=0.3;           %Altura da parede
8 Pr=0.69;          %Numero de Prandtl
9 %k=0.03208;       %Coeficiente de condução do ar
10 v=24.14e-6;      %Viscosidade cinemática do ar
11
12 Gr=((g*beta*(Tp-T)*(L^3))/(v^2)); %Numero de Grashoff
13 Ra=Gr*Pr;         %Numero de Rayleigh
14
15 if Ra>10^5 && Ra<10^9
16     Nu=0.59*((Ra)^(1/4));          %Nusselt para 10^5<Ra<10^9
17 else Ra>10^9 && Ra<10^13
18     Nu=0.5*((Ra)^(1/3))           %Nusselt para 10^9<Ra<10^13
19 end
20
21 h=Nu*k/L           %Coeficiente de convecção natural
```